www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

PHILIPS TECHNISCH TIJDSCHRIFT

JAARGANG 30, 1969, no. 5

Een precisiedraaibank met hydrostatische lagering en aandrijving

H. J. J. Kraakman en J. G. C. de Gast

Het werk in Philips' Natuurkundig Laboratorium aan machines voor precisiedraaiwerk werd vele jaren geleden aangevat op grond van de behoefte aan draaiwerk van optische kwaliteit. Kon aanvankelijk door één bij dit doel aangepaste draaibank aan de behoefte worden voldaan, de groeiende vraag maakte op den duur de constructie van meer machines nodig. Dit was aanleiding tot het maken van een geheel nieuw ontwerp. Volgens dit ontwerp is thans een eerste precisiedraaibank voor gebruik in het laboratorium gebouwd. Daarin wordt consequent van hydrostatische lagering en aandrijving gebruik gemaakt; sommige der toegepaste hydrostatische lagers hebben dank zij een speciaal regelsysteem een oneindig grote stijfheid. De hydraulische regeling van de verschillende bewegingen van werkstuk en beitel is tot een ongekende precisie opgevoerd.

Ongeveer dertig jaar geleden was er voor televisieontvangers met geprojecteerd beeld een lichtsterk optisch systeem nodig met grote openingshoek en zonder sferische aberratie. Aan deze eisen voldeed de zg. Schmidt-optiek, die bestaat uit een sferische spiegel met een correctielens. Het bleek mogelijk, deze correctielens te maken van gelatine waarvoor de rotatiesymmetrische gietvorm op een draaibank van een mal gekopieerd werd [1]; om de vereiste goede oppervlaktekwaliteit te verkrijgen, werd voor het draaien een diamanten beitel gebruikt. Een verdere verbetering van de draaikwaliteit werd in latere jaren verkregen door het hoofdspillager van de draaibank te vervangen door een precisielager met lagerspleten kleiner dan 1 μm [2].

Wegens de met deze draaibank en goede beitels realiseerbare hoge vormnauwkeurigheid en goede oppervlaktekwaliteit was de bank hoe langer hoe drukker bezet voor het maken van b.v. trilholtes, lenzen en spiegels voor lasers, parabolische spiegels, poolschoenen voor elektronenmicroscopen en elektrodes voor de miniatuur „Plumbicon" camerabuis. Ten gevolge van deze grote vraag ontstond de behoefte aan meer machines, bovendien beter tegen werkplaatsomstandigheden bestand. Uit deze behoefte is het ontwerp van de in dit artikel beschreven precisiedraaibank voortgekomen.

Voor de lagering van hoofdspil en sleden zijn hierin *hydrostatische lagers* toegepast; dit zijn lagers waarin het olielaagje door toevoer van olie onder druk in stand gehouden wordt. Bij dit lagertype is de dikte van het olielaagje tussen de lagerdelen, en daardoor ook de positie van het bewegende deel, onafhankelijk van hun relatieve snelheid. Bovendien mogen de lagerspleten onder zekere voorwaarden groot zijn (20 tot 40 μm), waardoor hydrostatische lagers ook bij sterk wisselende temperaturen toegepast kunnen worden zonder gevaar van klemmen. Dank zij de belangrijke eigenschap van hydrostatische lagers dat tussen de bewegende delen nooit metallisch contact bestaat treden geen ongelijkmatige wrijving („stick-slip") en

Ir. H. J. J. Kraakman, medewerker van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven; ir. J. G. C. de Gast, voorheen eveneens medewerker van dit laboratorium, thans van Philips' Hoofdindustriegroep Elcoma (Electronic Components and Materials), Nijmegen.

[1] H. Rinia en P. M. van Alphen, De vervaardiging van correctieplaten voor Schmidt-optieken, Philips techn. T. **9**, 349-356, 1947.

[2] De diamanten beitel en het precisielager waren gemaakt door L. M. Leblans; zie L. M. Leblans, Een precisie-draaibankkop, Philips techn. T. **19**, 48-49, 1957.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

slijtage op.

Ook voor de aandrijving van de sleden is van hydrostatische krachten gebruik gemaakt. Hiervoor was een aandrijving met zuiger en cilinder (een zg. *lineaire hydromotor*) een gunstige keuze, omdat daarin, in tegenstelling tot de gangbare schroefspil met moer, geen periodiciteit aanwezig is, en zo de „spoken" — periodieke onregelmatigheden — in het bewerkte oppervlak vermeden worden [3]. Voor de aandrijving van de hoofdspil zorgt een *roterende hydromotor*, waarvan het toerental gemakkelijk te regelen is en die compact met de hoofdspil samengebouwd kan worden; daarbij is hij niet gevoelig voor overbelasting.

Door toepassing van de genoemde hydrostatische componenten worden alle delen van de bank steeds door- en omspoeld met olie; deze bepaalt dan ook in korte tijd de temperatuur van de bank. Dit maakt een goede temperatuurregeling mogelijk. Dank zij deze temperatuurregeling en de afwezigheid van slijtage in de hydrostatische lagers, en ook dank zij de ongevoeligheid van de hoofdspilmotor voor overbelasting, mogen alle soorten draaiwerk op de bank verricht worden zonder dat de hoogste bereikbare kwaliteit mettertijd terugloopt; ook is de inlooptijd, nodig voordat de hoogste kwaliteit bereikt kan worden, verwaarloosbaar kort.

Bij de genoemde hydrostatische lageringen en aandrijvingen speelt de regeling van drukken en debieten een belangrijke rol. Voor het verkrijgen van een hoge oppervlaktekwaliteit der bewerkte vlakken is namelijk een nauwkeurig constant blijven van de verplaatsingssnelheden van beitel en werkstuk vereist. De voor de genoemde drie functies — lagering, aandrijving en regeling — nodige componenten werden door de auteurs tot de vereiste graad van nauwkeurigheid vervolmaakt en daarmee zijn componenten ter beschikking gekomen waarvoor men, ook buiten de hier beschreven draaibank, een uitgestrekt toepassingsgebied mag verwachten. Hierbij vallen vooral op de *hydrostatische dubbellagers* van de sleden, waaraan door een bepaalde wijze van drukregeling een oneindige stijfheid gegeven kan worden, de *lineaire motor*, de *roterende hydromotor* en de *regelkleppen*. In de laatste is een vèrgaande compensatie bereikt van de storende krachten die de vloeistofstroming door de kleppen teweegbrengt. Deze vier componenten zullen uitvoeriger worden behandeld; vooraf wordt evenwel een globaal beeld gegeven van het ontwerp van de draaibank als geheel en van het hydraulische systeem.

Doelstelling en ontwerp

De bank is bedoeld voor de bewerking van werkstukken tot 200 mm rond en lang, met de eis dat oppervlakken van optische kwaliteit worden verkregen. Als richtlijn bij het ontwerp heeft een maattolerantie van 1 μm gegolden en een maximale onrondheid van het gedraaide werkstuk van 0,1 μm. Deze toleranties, die slechts de functie van oriënterende waarden hadden, zijn gerealiseerd; bij een goed verspaanbaar materiaal met een goede (diamanten) beitel kan wellicht aan nog hogere eisen voldaan worden. Voor een maatvoering met de genoemde nauwkeurigheid is evenwel nodig dat de temperatuur van het werkstuk constant blijft: een stuk messing van 100 mm zet bij een temperatuurverhoging van 1 °C al 1,9 μm uit. Daarom zal men als het om nauwkeurige maten gaat in een ruimte met geregelde temperatuur werken; dit is echter niet nodig voor het bereiken van een hoge oppervaktekwaliteit, omdat de regeling van de temperatuur van de circulerende olie de bank voldoende onafhankelijk van de omgevingstemperatuur maakt. Het bereiken van een hoge oppervlaktekwaliteit was overigens de moeilijkste van de gestelde opgaven; naarmate het oppervlak meer de optische kwaliteit nadert ziet men namelijk iedere storing beter. Een krasje van 0,1 μm b.v. is al duidelijk zichtbaar.

Om alle bronnen van storing te vermijden, zijn niet, zoals bij een draaibank gebruikelijk is, de beide sleden die de langs- en dwarsbeweging van de beitel mogelijk maken op elkaar gestapeld. In plaats daarvan staat de beitelhouder op een slede die een dwarsbeweging kan uitvoeren, en de hoofdspil op een identieke slede die in langsrichting, dus evenwijdig met de as van rotatie, beweegt. Op een derde slede in het verlengde van de hoofdspil staat de center, die hier als vaste, d.w.z. niet meedraaiende, center is uitgevoerd. De drie sleden zijn op een grondplaat gemonteerd; op deze wijze is een compact en stijf geheel verkregen. *Fig. 1* toont het grondplan van de bank.

De lineaire hydromotoren die de langs- en dwarsbeweging aan de hoofdspil- en de beitelhouderslede geven

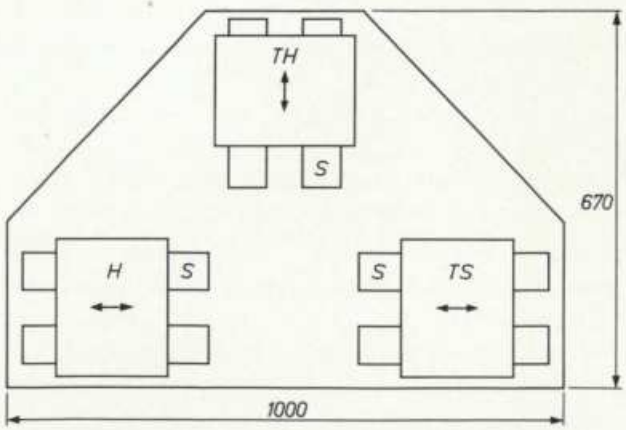

Fig. 1. Grondplan van de precisiedraaibank. *H* hoofdspil. *TH* beitelhouder. *TS* center. *S* leibanen van de sleden waarop deze drie hoofdgroepen staan. De maten van de grondplaat zijn aangegeven (in mm).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

zijn in het verlengde van de sleden aangebracht, om een zo goed mogelijk gedefinieerde beweging te verkrijgen en een zo stijf mogelijke constructie. Het motorhuis, de cilinder *Cil* (*fig. 2*), is aan de leibaan *S* bevestigd en de zuigerstang direct aan de slede *C*.

De roterende hydromotor, die de hoofdspil aandrijft, is bij de hoofdspil ingebouwd in wat bij een gewone draaibank de „vaste kop" heet. De met deze — in dit geval minder toepasselijke — naam aangeduide eenheid

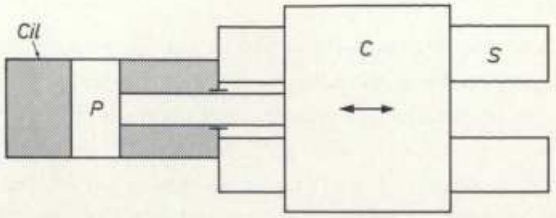

Fig. 2. De aandrijving van slede *C* door zuiger *P* onder invloed van de oliedruk in cilinder *Cil*. *S* is de leibaan.

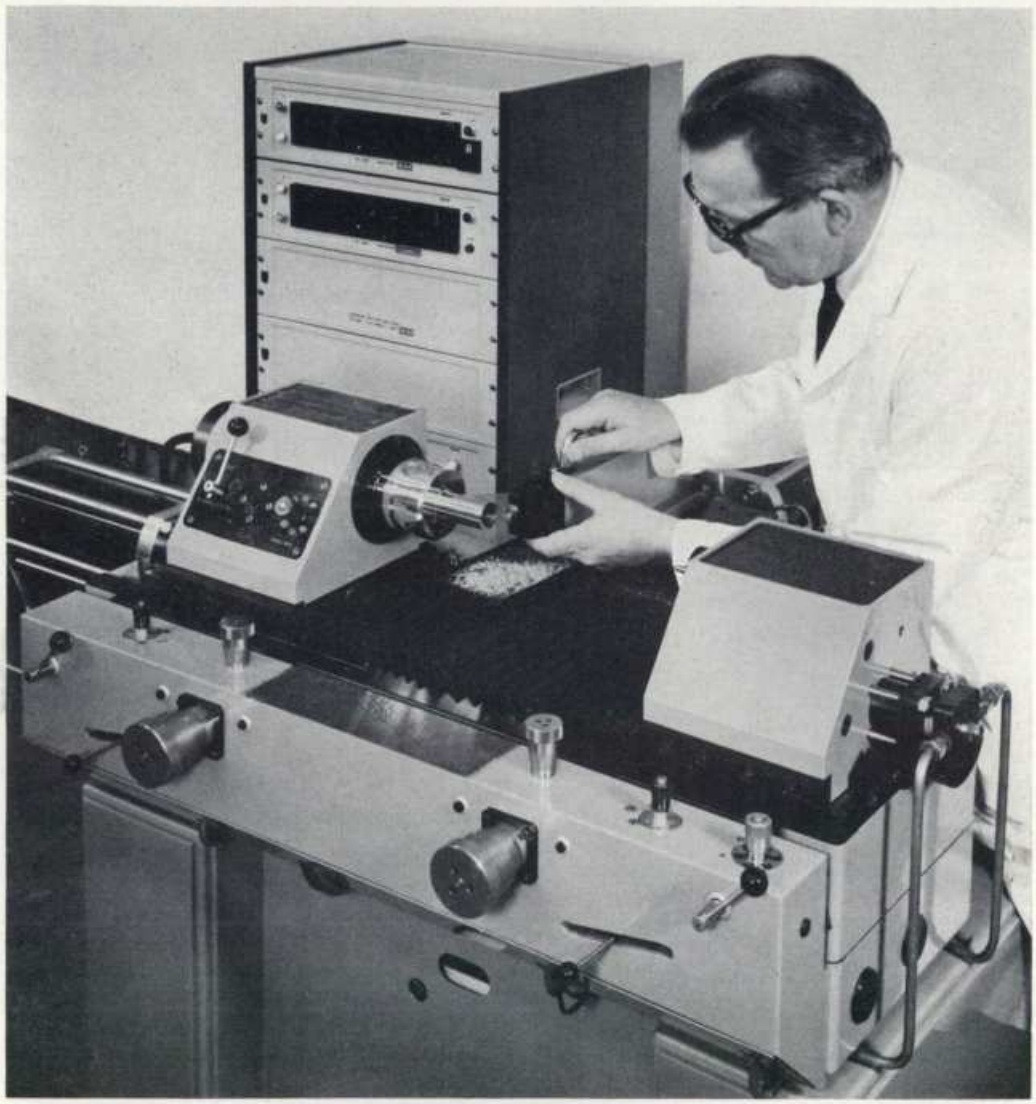

Fig. 3. De precisiedraaibank. In de frontbalk zijn regelkleppen voor het instellen van de snelheid van langs- en dwarsbeweging aangebracht. Op de achtergrond instrumenten voor indicatie van de langs- en dwarsverplaatsing met een nauwkeurigheid van 0,5 μm.

staat in zijn geheel op de slede die de langsbeweging uitvoert.

Op de foto van de bank in *fig. 3* onderscheidt men duidelijk de drie hoofdgroepen: hoofdspil, beitelhouder en center. In de frontbalk van de bank zijn bedieningsorganen voor het instellen van posities en snelheden aangebracht. Achter de bank staan twee decimale tellers opgesteld; hierop kan men de verplaatsingen van langs- en dwarsslede op 0,5 μm nauwkeurig aflezen. Deze verplaatsingen worden met een optisch meetsysteem [4] gemeten.

[3] W. R. Horsfield, Ruling engine with hydraulic drive, Appl. Optics **4**, 189-193, 1965. De „spoken" treden zelfs op als de schroefspil hydrostatisch in de moer gelagerd is: J. H. Rumbarger en G. Wertwijn, Hydrostatic lead screws, Machine Design **40**, no, 9, 218-224, 1968.

[4] Een artikel hierover zal binnenkort in dit tijdschrift verschijnen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Hydraulisch schema

Van het hydraulische systeem van de precisiedraaibank geeft *fig. 4* een schema dat gebruik maakt van de in de hydrauliek gangbare symbolen. In dit schema vindt men de drie hoofdgroepen van de bank — de hoofdspilgroep *H*, de beitelhoudergroep *TH* en de centergroep *TS* — terug; *P* is de pompeenheid. In iedere hoofdgroep treft men een lineaire motor aan (resp. *1*, *2* en *3*). De lineaire motor *1* van de hoofdspilgroep staat via de schakelklep *7* in verbinding met de instelbare debietregelklep *9*, waarmee de snelheid wordt geregeld waarmee de cilinder van *1* vol- of leegstroomt en dus de snelheid waarmee de zuiger zich verplaatst. Een zelfde schakeling komt voor in de beitelhoudergroep *TH*. Bij de centergroep is het systeem anders, omdat de lineaire motor daar alleen de opgave heeft, met een constante kracht tegen het werkstuk te drukken.

Verder komt in de hoofdspilgroep *H* de roterende hydromotor *16* voor. Deze heeft een paralleltak met een instelbare debietregelklep *11*. De som van de stromen door beide takken wordt constant gehouden door een vaste debietregelklep *18*. Regelen van het motortoerental gebeurt door de stroom door *11* te variëren; doordat de som van de stromen door *16* en *11* constant blijft, varieert dan de stroom door *16* in tegengestelde zin en daarmee het toerental van de motor. Een voordeel van een van het toerental onafhankelijke totale stroom is dat het drukverval in leidingen e.d. altijd even groot blijft, zodat op alle punten het drukniveau onafhankelijk van het toerental is.

De pompeenheid *P* voorziet het gehele hydraulische systeem van schone olie van de gewenste temperatuur en met een overdruk van 40 bar [5]. Deze druk is, vergeleken met wat in de hydrauliek gebruikelijk is, betrekkelijk laag. Het voordeel daarvan is dat de van de pomp afkomstige onvermijdelijke drukrimpels ook kleiner zijn en gemakkelijker af te vlakken. Behalve van het drukniveau is de amplitude van de drukrimpels ook afhankelijk van de aanwezigheid van lucht in de

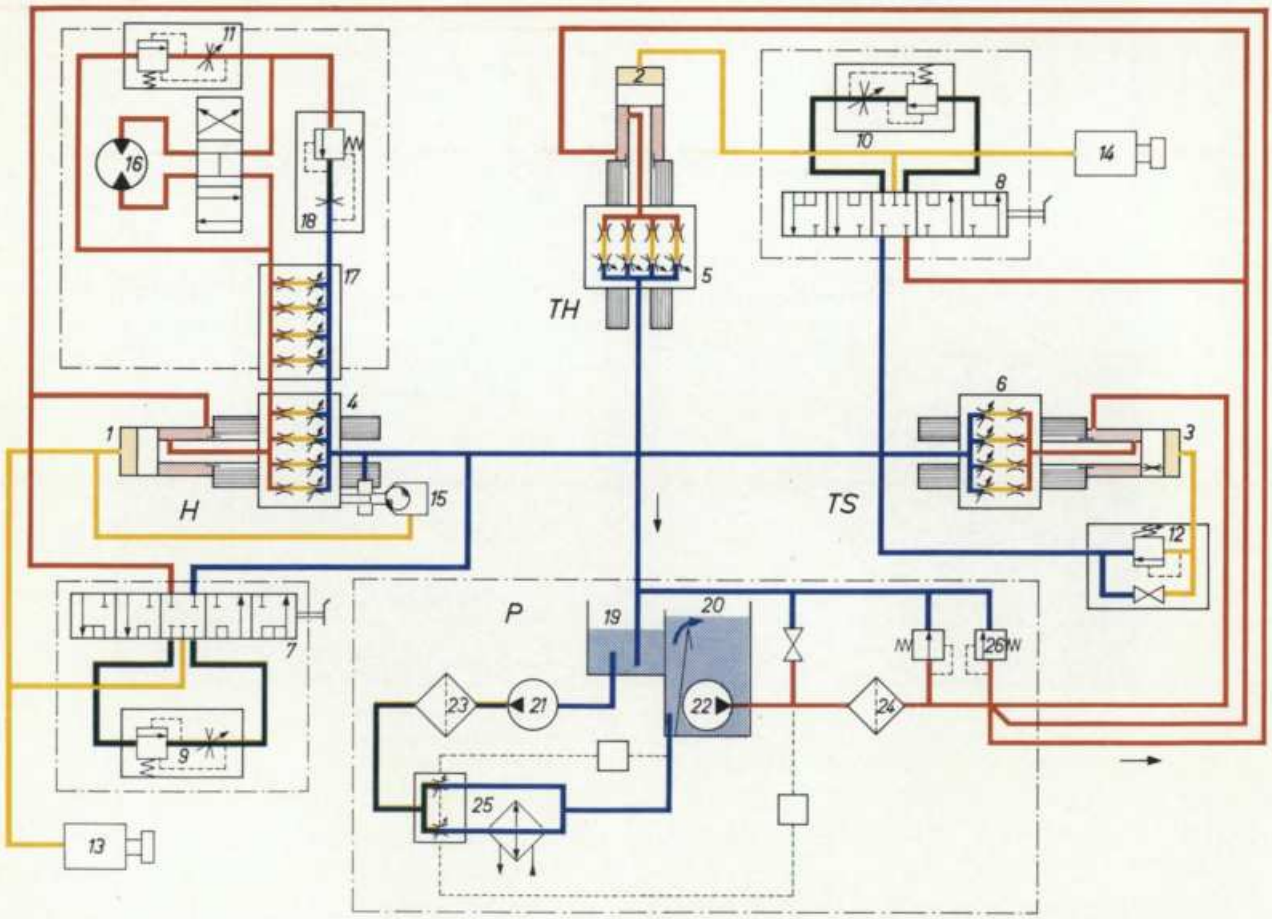

Fig. 4. Schema van het hydraulische systeem van de precisiedraaibank. *H* hoofdspilgroep. *TH* beitelgroep. *TS* centergroep. *P* pompeenheid. De kleuren geven het niveau van de oliedruk aan: *rood* = voedingsdruk p_s; *geel* = $\frac{1}{2}p_s$; *groen* < $\frac{1}{2}p_s$ doch hoger dan atmosferische druk; *blauw* = atmosferische druk. *1*, *2*, *3* lineaire hydromotoren. *4*, *5*, *6* hydrostatisch gelagerde sleden. *7*, *8* schakelkleppen. *9*, *10*, *11* instelbare debietregelkleppen. *12* instelbare drukregelklep centerslede. *13*, *14* fijninstelling positie lineaire motoren. *15* eindstop. *16* roterende hydromotor. *17* hydrostatische lagers roterende hydromotor. *18* vast ingestelde debietregelklep. *19* voorreservoir. *20* hoofdreservoir. *21* hulppomp. *22* hoofdpomp. *23*, *24* oliefilters. *25* temperatuurregelingssysteem. *26* regelklep voedingsdruk.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

olie. Deze krijgt in het hoofdreservoir *20* gelegenheid te ontsnappen; de in voorreservoir *19* opgevangen retourolie wordt door hulppomp *21* via een filter *23* en een temperatuurregelingssysteem met warmtewisselaar *25* naar het hoofdreservoir *20* gepompt en stroomt daar vlak onder het vloeistofoppervlak in uit door een zich trechtervormig verwijdende diffusor, waarin turbulente olie tot rust kan komen. De hoofdpomp *22* pompt per minuut 20 liter olie naar de drie hoofdgroepen; op het vertakkingspunt der drie toevoerleidingen zorgt drukregelklep *26* voor het constant houden van de voedingsdruk.

De hydrostatische lagers

In een hydrostatisch lager zijn de lagerdelen *I* en *II* (zie *fig. 5*) van elkaar gescheiden door een vloeistoflaagje, dat dank zij de daarin heersende statische druk p_r de belasting F draagt. Daar het lager niet afgedicht is, stroomt vloeistof uit het lager, waarbij de uitstroomweerstand R_2 afhankelijk is van de dikte van het laagje (de lagerspleethoogte) h, de lengte l en de breedte b. De vloeistof (meestal olie) wordt toegevoerd vanuit een uitwendige bron via een voorweerstand R_1, terwijl de lagerspleet in het midden meestal verdiept is tot een kamer [6].

Het vloeistoflaagje kan men ook door het lager zelf laten opbouwen, en wel door de onderlinge beweging van de lagerdelen te gebruiken voor een pompwerking. Zo'n lager, waartoe ook het eerder genoemde precisielager van Leblans [2] en het destijds beschreven spiraalgroeflager [7] behoren, wordt een hydrodynamisch lager genoemd. Bij een hydrodynamisch lager is het vloeistoflaagje, en daarmee de positie van de lagerdelen, afhankelijk van hun relatieve snelheid. Dat is voor precisiemachines ongewenst, vooral in die gevallen waarbij de snelheid ook nul kan zijn, zoals bij sleden vaak voorkomt.

Een hydrostatisch lager bestaat dus steeds uit twee in serie geschakelde weerstanden R_1 en R_2, die door een uitwendige bron worden voorzien van vloeistof onder druk. Door de weerstanden R_1 en R_2 vloeit in stationaire toestand dezelfde vloeistofstroom Φ, en de druk p_r tussen de weerstanden is afhankelijk van R_2 volgens:

$$p_r = p_s R_2/(R_1 + R_2), \quad \ldots \quad (1)$$

waarin p_s de druk van de bron is.

De stroming door de lagerspleet is laminair; R_2 bestaat uit de parallelschakeling van twee identieke lagerspleten met elk een weerstand $2R_2$, die volgt uit de vergelijking voor een laminaire stroming:

$$\tfrac{1}{2}\Phi = \frac{p_r}{2R_2} = \frac{bh^3}{12\eta l} p_r. \quad \ldots \quad (2)$$

In deze vergelijking, die we in dit artikel nog vaker zullen tegenkomen, is η de viscositeitscoëfficiënt van de vloeistof. De laminaire stromingsweerstand R_2 is om-

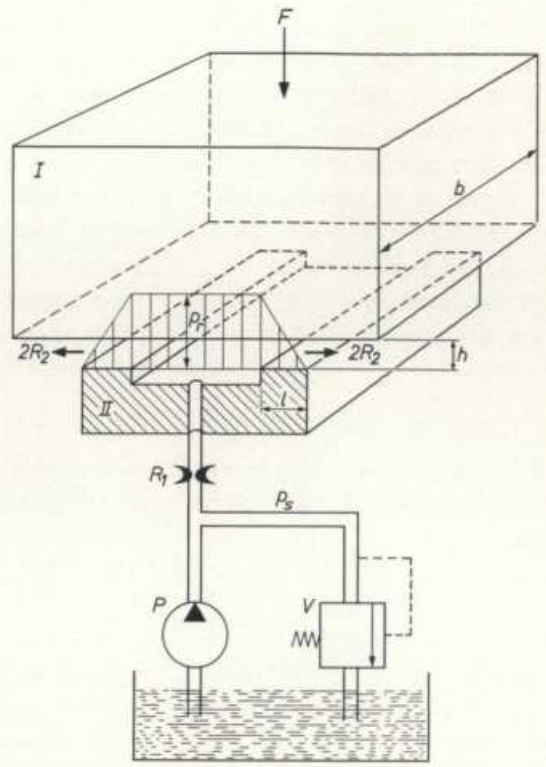

Fig. 5. Schematische voorstelling van een hydrostatisch lager. *I* en *II* lagerdelen. F belasting. P oliepomp. V drukregelklep. R_1 voorrestrictie. R_2 totale uitstroomweerstand, gevormd door twee parallel staande uitstroomspleten met breedte b, lengte l en hoogte h. p_s voedingsdruk. p_r druk in de kamer van het lager; het profiel geeft aan hoe de druk over de lagerspleet afneemt.

gekeerd evenredig met de derde macht van de spleethoogte h. We zien het eenvoudigst hoe de kamerdruk p_r met de spleethoogte h varieert, als we schrijven:

$$R_2 = R_{20}\,(h_0/h)^3,$$

waarin R_{20} en h_0 de waarden van R_2 en h zijn in het geval van belasting nul, en dit in (1) substitueren. Dit geeft:

$$p_r = \frac{1}{1 + (R_1/R_{20})(h/h_0)^3}\, p_s. \quad \ldots \quad (3)$$

We zien aan deze uitdrukking dat, wanneer door een toenemende belasting F de spleethoogte h kleiner wordt, de kamerdruk p_r in het lager toeneemt; de grotere druk levert, werkend op het effectieve lageroppervlak A, een kracht die evenwicht maakt met de toegenomen belasting.

Bij het ontwerp van een hydrostatisch lager worden de afmetingen bepaald door het gewenste draagvermo-

[5] 1 bar = 10^5 N/m^2 ≈ 1,020 at. Wanneer drukniveaus worden opgegeven, is altijd de overdruk ten opzichte van de atmosferische druk bedoeld.

[6] H. C. Rippel, Design of hydrostatic bearings, Machine Design **35**, 1963 (10 delen). Zie ook H. Opitz, Aufbau und konstruktive Auslegung hydrostatischer Lager, Bericht über die VDW-Arbeitstagung am 4. und 5. Februar 1965, Technische Hochschule Aken.

[7] E. A. Muijderman, Nieuwe lagervormen: gaslager en spiraalgroeflager, Philips techn. T. **25**, 296-316, 1963; E. A. Muijderman, Spiral groove bearings, dissertatie, Delft 1964.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

gen en de gewenste lagerstijfheid. Met het draagvermogen van een hydrostatisch lager is de maximale belasting F_{max} bedoeld die toegelaten mag worden (d.w.z. waarbij de lagerdelen elkaar nog net niet raken). Onder die belasting is de lagerspleethoogte h ongeveer nul, waardoor de uittreeweerstand R_2 naar oneindig gaat en de kamerdruk p_r gelijk wordt aan de voedingsdruk p_s, zodat $F_{max} = Ap_s$.

De lagerstijfheid K is gelijk aan de belastingverandering ΔF, gedeeld door de daaruit resulterende verplaatsing $-\Delta h$ van het bewegende deel I naar II:

$$K = -\mathrm{d}F/\mathrm{d}h\,.$$

Met $F = Ap_r$ kan K uit (3) berekend worden. Met een voor kleine uitwijking Δh toelaatbare benadering vinden we:

$$K = \xi\, Ap_s/h_0\,. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

Hierin is ξ een dimensieloze factor, die vooral bepaald wordt door de eerste weerstand of voorrestrictie R_1. Uit (4) volgt aan welke eisen we, bij het gebruik van een vaste voorrestrictie R_1, moeten voldoen om een stijf lager te verkrijgen, nl. een groot lageroppervlak, hoge voedingsdruk en kleine spleethoogte.

Dezelfde uitdrukking, maar met een tweemaal zo grote waarde van de evenredigheidsconstante, geldt ook voor een hydrostatisch lager in dubbele uitvoering (*fig. 6*). In het hydrostatische dubbellager is het in fig. 5 weergegeven principe aan beide zijden van het bewegende deel I toegepast. Door de zo ontstane symmetrische constructie worden de loopeigenschappen en de temperatuurafhankelijkheid van het lager sterk verbeterd.

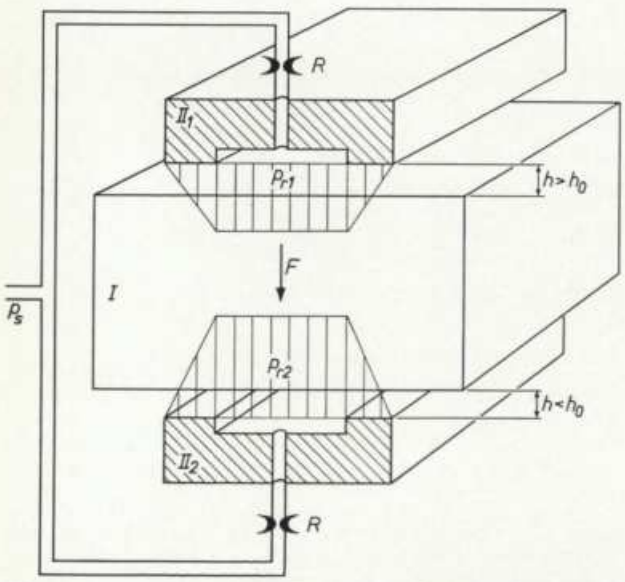

Fig. 6. Schematische voorstelling van een hydrostatisch dubbellager. I bewegend deel. II_1 en II_2 stilstaande delen. F belasting. R voorrestricties. h lagerspleethoogte. h_0 waarde van h wanneer $F = 0$ is. p_s voedingsdruk. p_{r1} en p_{r2} drukken in de lagerkamers.

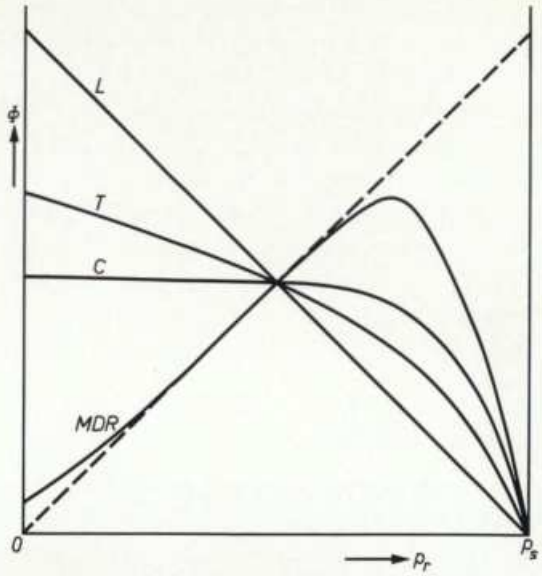

Fig. 7. De oliestroom Φ door een hydrostatisch lager als functie van de druk p_r in de lagerkamer bij verschillende typen van voorrestricties: L laminaire stromingsweerstand, T turbulente stromingsweerstand, C regelklep voor constant debiet, MDR membraandubbelrestrictie. De onderbroken lijn geeft aan hoe de volumestroom met de kamerdruk moet verlopen om het lager oneindig stijf te maken. Alleen de M.D.R. voldoet in een zeker gebied aan deze eis.

De invloed van de aard van de voorrestrictie op de lagerstijfheid wordt duidelijk uit de grafiek in *fig. 7*. De streeplijn in deze grafiek geeft de voorwaarde weer waaraan de stroom Φ door het lager moet voldoen in het geval van een oneindig stijf lager, d.i. een lager waarbij de spleethoogte h onafhankelijk van de belasting is. Indien in dat geval het lichaam I belast wordt met een kracht F, moet naar de kamer met de hoogste druk het debiet toenemen en naar de andere afnemen om het noodzakelijke drukverschil te krijgen. De getrokken lijnen geven aan hoe bij vier typen van voorrestricties het debiet Φ met de kamerdruk p_r verloopt. Drie ervan worden meestal bij hydrostatische lagers toegepast [6], nl. de laminaire stromingsweerstand (L), de turbulente stromingsweerstand (T) en de regelklep voor constant debiet (C). Met deze voorrestricties is het, zoals uit fig. 7 blijkt, niet mogelijk een oneindig stijf lager te maken. De vierde curve behoort bij de in Philips' Natuurkundig Laboratorium ontwikkelde *membraandubbelrestrictie* (M.D.R.) [8]. Daarmee is het mogelijk binnen een bepaald gebied aan de gestelde voorwaarde te voldoen.

De membraandubbelrestrictie wordt, in tegenstelling tot de eerder genoemde typen van voorrestrictie, door de belastingvariaties beïnvloed, waardoor een teruggekoppeld regelsysteem ontstaat. Zij is, samen met

[8] J. G. C. de Gast, Een nieuwe variabele voorrestrictie voor hydrostatische dubbelfilm-lagers en zijn toepassing in precisiegereedschapswerktuigen, Ingenieur **80**, O 51-62, 1968 (no. 19).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

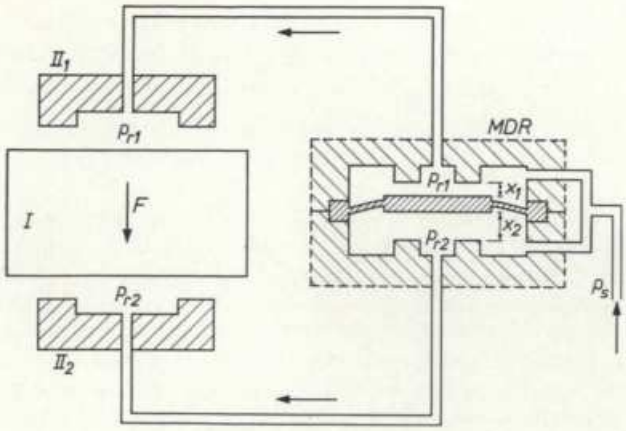

Fig. 8. Schematische voorstelling van een hydrostatisch dubbellager met een membraandubbelrestrictie (*MDR*) die de oliestroom door het lager regelt. *I* bewegend deel. II_1 en II_2 vaste lagerdelen. p_s voedingsdruk. Bij toenemende belasting F neemt de druk p_{r2} toe en de druk p_{r1} af. Onder invloed hiervan verplaatst het membraan in de M.D.R. zich naar boven en wordt meer olie naar de onderste lagerkamer doorgelaten.

een lager, in *fig. 8* schematisch weergegeven. Indien er op het bewegende deel *I* een kracht F wordt uitgeoefend, moet in de beide lagerkamers een drukverschil $p_{r2} - p_{r1}$ ontstaan om met de kracht F evenwicht te maken. Daar het drukverschil $p_{r2} - p_{r1}$ ook op het membraan werkt, gaat dat doorbuigen naar de kant van de laagste druk. De spleethoogte x_2 tussen het membraan en het huis aan de kant van de hoogste kamerdruk wordt dan groter. De stroming door de spleet is laminair; daardoor is de invloed van de grotere spleethoogte sterker dan die van het verkleinde drukverschil $p_s - p_{r2}$ (formule 1), zodat er een groter debiet naar de kamer met de hoogste druk gaat.

Een belangrijke eigenschap van de membraandubbelrestrictie is dat een van de parameters de voedingsdruk p_s is, waardoor in een reeds gemonteerde constructie de stijfheid nog kan worden gewijzigd, en wel van een positieve via een oneindige tot zelfs een negatieve waarde (*fig. 9*). Hierdoor is het mogelijk elastische vervormingen te compenseren die in de overige constructiedelen kunnen optreden.

In het teruggekoppelde systeem van lager en membraandubbelrestrictie is in principe de mogelijkheid van instabiliteit aanwezig. Deze instabiliteit uit zich in een dergelijk systeem in spontaan oscilleren met een bepaalde frequentie. Wanneer zo'n systeem wel stabiel is, kan het de toestand van instabiliteit toch zo dicht naderen dat het na iedere verstoring in een resonantiefrequentie uitslingert. Zowel het oscilleren als het duidelijk naar voren treden van resonantiefrequenties kan bij het hier beschreven systeem worden voorkomen door een zodanige dimensionering van het lager dat in het systeem voldoende demping aanwezig is. Dit blijkt uit *fig. 10*, waarin amplitude

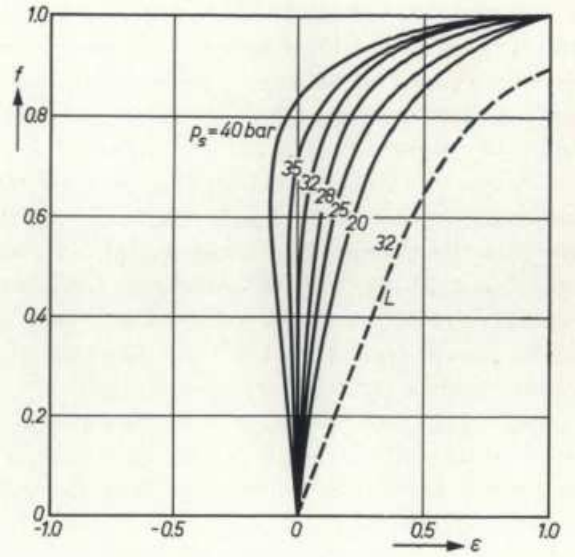

Fig. 9. De belasting van een hydrostatisch dubbellager met M.D.R.-regeling als functie van de bijbehorende verplaatsing van het gelagerde deel, een en ander bij verschillende voedingsdrukken p_s. Uitgezet zijn genormeerde grootheden: verticaal de belasting gedeeld door het draagvermogen van het lager ($f = F/Ap_s$), horizontaal de variatie van de lagerspleethoogte gedeeld door de spleethoogte zonder belasting ($\varepsilon = \Delta h/h_0$). De stijfheid van het lager is gelijk aan de helling van de curve. De M.D.R. is zodanig gedimensioneerd dat bij $p_s = 32$ bar de lagerstijfheid over een deel van zijn traject oneindig groot is. Bij voedingsdrukken groter dan 32 bar heeft het lager zelfs een negatieve stijfheid. Ter vergelijking geeft de onderbroken curve *L* het geval waarin een laminaire stromingsweerstand de voorrestrictie vormt.

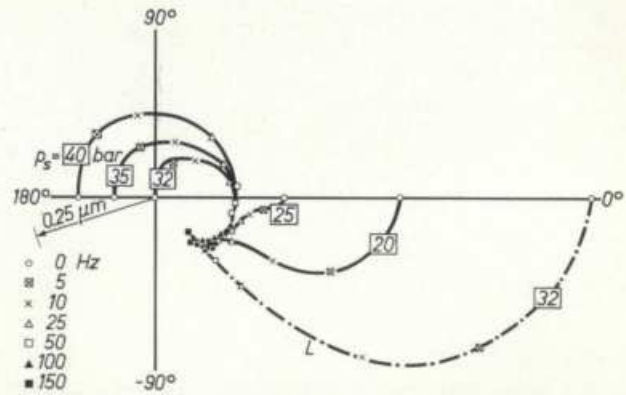

Fig. 10. Voorstelling in een polair diagram van amplitude en faze van de uitwijking van een hydrostatisch dubbellager met M.D.R.-regeling onder invloed van een sinusvormig wisselende belasting. De bij een bepaalde voedingsdruk p_s van het lager voor verschillende frequenties gemeten waarden zijn telkens door een curve verbonden. Voor $p_s = 32$ bar heeft het lager een oneindige statische stijfheid. Het verloop der curves toont dat er geen duidelijke resonanties bij bepaalde frequenties optreden, zodat het systeem dynamisch stabiel is. Bij de hoogste frequenties heeft de voedingsdruk weinig invloed meer op het verloop der curves; de demping in het lager domineert dan.

De streep-stip-lijn *L* in de figuur geeft het dynamisch gedrag weer van het hydrostatisch dubbellager bij gebruik van een laminaire stromingsweerstand in plaats van de M.D.R. als voorrestrictie.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

en fazehoek van de uitwijking van het lager onder een sinusvormig wisselende belasting zijn weergegeven bij verschillende frequenties en verschillende voedingsdrukken. Er treedt bij geen enkele frequentie een duidelijke resonantie op [9].

Niet alleen de mogelijkheid van een zeer grote stijfheid, maar vooral ook die van voldoende stijfheid bij grote spleethoogte, lage voedingsdruk en kleine lagerafmetingen, dus juist bij een volgens formule (4) ongunstige maar uit andere overwegingen vaak gewenste dimensionering, behoort tot de belangrijke voordelen van de membraandubbelrestrictie [10].

In *fig. 11* ziet men hoe de membraandubbelrestrictie in een gleuf van een lagerblok van de draaibank is ingebouwd. Ieder paar lagerkamers heeft zijn eigen membraandubbelrestrictie.

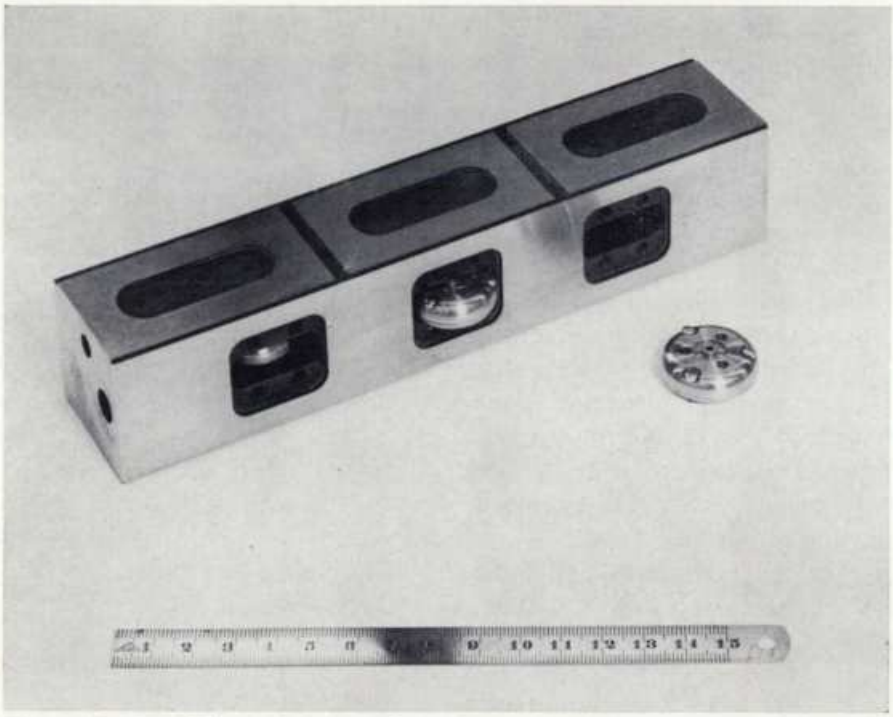

Fig. 11. Een lagerblok van de hydrostatisch gelagerde slede met drie paar lagerkamers. Bij ieder paar kamers behoort een M.D.R., die in een gleuf van het lagerblok zijn plaats vindt.

Slede met leibaan

Bij toepassing van hydrostatische dubbellagers zijn er steeds grote voorspankrachten aanwezig (in de lagers voor de slede b.v. 10^4 N), die de constructie sterk gaan vervormen indien die krachten tot buigende momenten aanleiding geven. In het sledeontwerp, dat in dwarsdoorsnede getekend is in *fig. 12*, zijn de hydrostatische krachten zo aangebracht dat zowel op de slede als op de leibaan alleen maar druk-, trek- en afschuifkrachten werken, die samen een gesloten krachtenfiguur vormen in het vlak van tekening [11].

De slede bezit drie gelijke lagerblokken (zoals afgebeeld in fig. 11), die gemonteerd zijn aan het sledefreem. Doordat de blokken aan weerszijden gelagerd zijn, is ieder blok hydraulisch gebalanceerd; daardoor is het sledefreem ontlast van de hydrostatische voorspankrachten. De leibaan volgens fig. 12 is uit één stuk gemaakt en alle geleidingsvlakken zijn geslepen.

De leibaan kan ook opgebouwd worden uit prismatische balken (*fig. 13*). Deze constructie is minder stijf dan die volgens fig. 12; de vervormingen van een zo opgebouwde leibaan door de hydrostatische krachten zijn gemeten en aangegeven in *fig. 14*. Een groot voordeel is evenwel dat de balken zodanig gemonteerd kunnen worden dat afwijkingen over een lengte groter dan de halve lagerbloklengte er door buiging en fixatie van de balk uitgehaald kunnen worden. Met deze leibanen is een rechtgeleiding gemaakt voor de onlangs in dit tijdschrift beschreven repeteercamera [12]; daarbij is, als de slede zich over 5 cm verplaatst, de afwijking van de rechte lijn kleiner dan 0,03 μm en de draaiing van de slede minder dan 0,1 seconde.

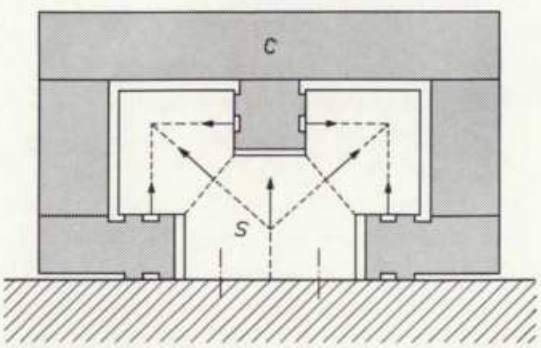

Fig. 12. Dwarsdoorsnede van leibaan *S* en slede *C*. De leibaan is uit één stuk en zo geconstrueerd dat de erop werkende krachten in een trekkracht resulteren, die geen afwijking van de rechte lijn ten gevolge heeft.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

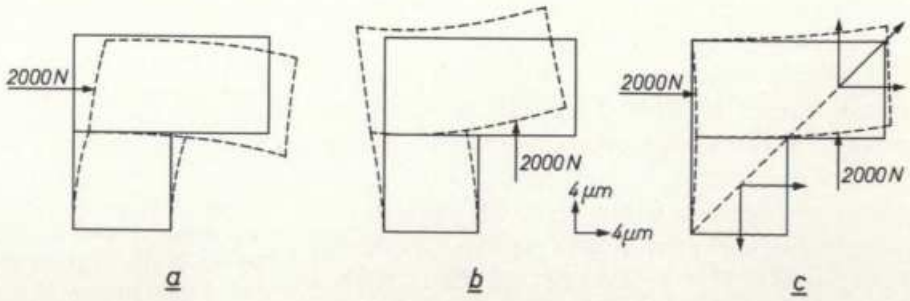

Fig. 14. Gemeten vervormingen aan een leibaan volgens fig. 13, *a*) wanneer alleen een horizontale kracht werkzaam is, *b*) wanneer alleen een verticale kracht werkzaam is, *c*) wanneer beide werkzaam zijn. In geval (*c*) resteert slechts een kleine vervorming.

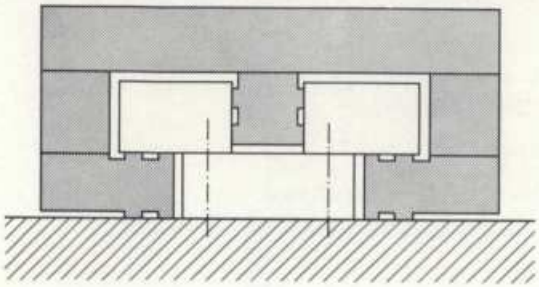

Fig. 13. Dwarsdoorsnede van een leibaan die niet uit één stuk is gemaakt maar opgebouwd uit drie balken. Dit geeft de mogelijkheid bij de montage nog kleine afwijkingen in de balken te corrigeren door ze te buigen en te fixeren.

De lineaire motor

De toegepaste lineaire motor is een combinatie van zuiger en cilinder (*fig. 15*), met een oppervlakteverhouding van de zuiger tot de zuigerstang van 2:1. Wanneer de zuiger stil staat en de ringvormige ruimte tussen de cilinder en de zuigerstang belast wordt met de voedingsdruk p_s, heerst er in de met olie gevulde ruimte links van de zuiger een druk p_1. Uit het krachtenevenwicht voor de zuiger volgt dan bij de gegeven oppervlakteverhouding en een uitwendige belasting gelijk nul:

$$p_1 = \frac{p_s}{2}. \qquad \ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

Wordt nu de ruimte links van de zuiger via een weerstand R verbonden met olie die staat onder de voedingsdruk p_s, dan krijgt de zuiger een snelheid v naar rechts; wordt de ruimte links van de zuiger via R met olie onder atmosferische druk verbonden, dan krijgt de zuiger een even grote snelheid v naar links. In beide gevallen wordt namelijk de oliestroom $\Phi = \frac{1}{4}\pi D^2 v$ (D is de binnendiameter van de cilinder) gegeven door:

$$\Phi = \frac{p_s - p_s/2}{R}.$$

Dus is:

$$v = \frac{2p_s}{\pi D^2 R}. \qquad \ldots\ldots\ldots \quad (6)$$

Het is voor een hoge bewerkingskwaliteit noodzakelijk dat v binnen 0,1 % constant is. Uit (6) ziet men onmiddellijk dat een eerste voorwaarde daarvoor is dat de voedingsdruk p_s binnen 0,1 % constant blijft. Ook de belasting van de motor moet constant zijn. Deze is bij de afleiding van (6) verwaarloosd maar kan als een van p_s af te trekken term in rekening worden gebracht. Het zo nauwkeurig constant houden van de voedingsdruk en vooral van de belasting is uiterst moeilijk; daarom is besloten de constantheid van v rechtstreeks te waarborgen door de volumestroom Φ nauwkeurig constant te houden. Hiertoe is R vervan-

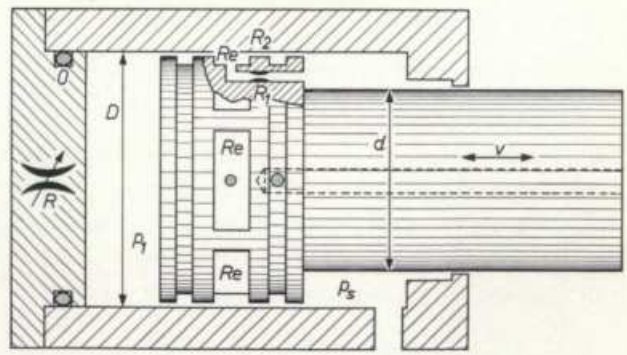

Fig. 15. Vereenvoudigde doorsnedetekening van een lineaire motor. De ruimte links van de zuiger staat via een laminaire stromingsweerstand R in verbinding hetzij met de voedingsdruk p_s (zuiger beweegt naar rechts) hetzij met de atmosferische druk (zuiger beweegt naar links). Het zuigeroppervlak $\frac{1}{4}\pi(D^2 - d^2)$, waarop p_s werkt, is half zo groot als het oppervlak $\frac{1}{4}\pi D^2$, waarop p_1 werkt, zodat bij evenwicht van hydraulische krachten $p_1 = \frac{1}{2}p_s$. Via de in de zuiger ingebouwde restrictie R_1 en de stromingsweerstand R_2 tussen zuiger en cilinderwand komt een hydrostatische lagering van de zuiger in de cilinder tot stand. Daartoe zijn in de zuiger vier lagerkamers *Re* aangebracht. *O* O-ring.

[9] J. G. C. de Gast, Dynamic behaviour of a double film hydrostatic bearing with variable flow restrictor, verschijnt in Trans. ASME, J. Lubr. Technol.

[10] Hierdoor kunnen ook snel lopende assen (tot 6000 omw/min) bij gering olieverbruik en wrijvingsverlies hydrostatisch gelagerd worden. Stijfheid, draagvermogen en demping zijn daarbij beter dan bij een luchtlager; zie H. L. Wunsch, Air bearing applications to machine tools and measuring instruments, Trans. ASME, J. Lubr. Technol., **90F**, 680-686, 1968 (no. 4).

[11] J. G. C. de Gast, Berekening en constructie van hydrostatische lagers, Polytechn. T. Werktuigbouw **23**, 141-150, 187-196, 1968 (nos. 4, 5).

[12] F. T. Klostermann, Een repeteercamera voor het maken van fotomaskers voor geïntegreerde schakelingen, Philips techn. T. **30**, 57-70, 1969 (no. 3).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

gen door een debietregelklep (zie voor de werking hiervan het hoofdstuk over de regelkleppen).

Daarnaast komt de constantheid van de snelheid in gevaar doordat de overdruk die in de cilinder bestaat er toe kan leiden dat deze op verschillende plaatsen een iets verschillende binnendiameter D krijgt. Om een zo homogeen mogelijke vervorming van de cilindermantel te verkrijgen, is deze niet vast met de cilinderkop verbonden maar los opgelegd; dit is zichtbaar in de gedetailleerde doorsnedetekening van de lineaire motor die in *fig. 16* gegeven wordt.

Voor een cilinderdiameter van 80 mm moeten dan de afwijkingen $\Delta D < 4\,\mu$m zijn. Nu is bij 40 bar drukverschil en een wanddikte van 6 mm ΔD al 10 μm. Indien de cilinder was uitgevoerd zoals geschetst is in fig. 15, zou deze afwijking in het midden van de cilinder optreden maar aan de beide uiteinden niet. Aan het ene uiteinde vormt namelijk de cilinderkop een versteviging en het andere uiteinde is door de afdichtende O-ring *O* aan de inwerking van de overdruk onttrokken. In het volgens fig. 16 uitgevoerde ontwerp zijn de genoemde effecten voorkomen door de cilinder *1* niet vast met de cilinderkop *4* te verbinden, maar vrij op te leggen, en door de afdichting *6* aan de andere kant op het kopvlak van de cilindermantel aan te brengen.

Ook het drukverschil over de zuiger geeft een deformatie

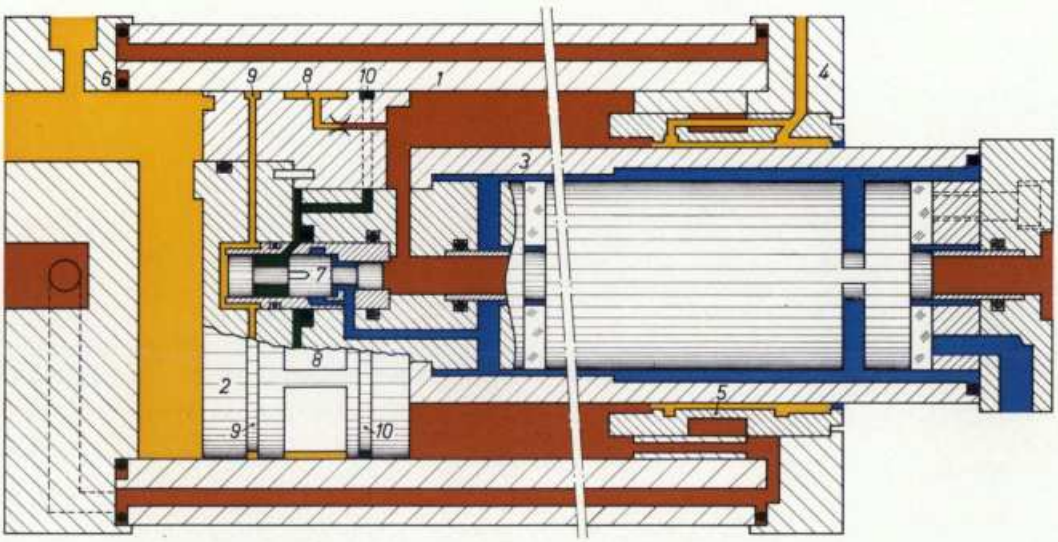

Fig. 16. Volledige doorsnedetekening van de in de draaibank aangebrachte lineaire motor. De kleuren corresponderen met verschillende drukken van de olie: *rood* = voedingsdruk p_s; *geel* = $\frac{1}{2}p_s$; *groen* < $\frac{1}{2}p_s$; *blauw* = atmosferische druk. *1* cilinder. *2* zuiger. *3* zuigerstang. *4* cilinderkop. *5* dunwandig cilindrisch stuk, waarin de zuigerstang kan worden geklemd om volkomen stilstand te bereiken. *6* O-ring op het kopvlak van de cilindermantel. *7* regelklepje. *8* lagerkamers. *9* ringkanaal onder gemiddelde lagerkamerdruk. *10* uitstroomringkanaal. Het in de zuiger *2* ingebouwde regelklepje *7* houdt de druk in de lagerkamers *8* van de zuiger gelijk aan die links van de zuiger, dat wil zeggen gelijk aan $\frac{1}{2}p_s$.

Een derde oorzaak van een niet constante zuigersnelheid kan gelegen zijn in lekstromen tussen de zuiger en de cilinderwand. Met behulp van een in de zuiger ingebouwd regelklepje (*7* in fig. 16) kunnen de oliedrukken in de ringkanalen en lagerkamers die in het zuigeroppervlak zijn aangebracht zo ingesteld worden dat op elegante wijze tegelijkertijd een volledige afdichting van de zuiger en een hydrostatische lagering van de zuiger in de cilinder tot stand wordt gebracht.

De toelaatbare *afwijkingen in de cilinderdiameter* zijn maar heel klein. De invloed op de snelheid van een afwijking ΔD in de diameter van de cilinder volgt uit (6) en kan met verwaarlozing van termen van hogere orde geschreven worden als:

$$\Delta v/v_0 = -2\Delta D/D_0,$$

waarin v_0 en D_0 de nominale waarden van v en D zijn. Is de eis dat $\Delta v < 10^{-3}v_0$ is, dan moet, omdat er ook nog andere foutenbronnen zijn, de fout ten gevolge van een diameterafwijking globaal genomen nog een orde kleiner zijn, dus:

$$2\Delta D < 10^{-4}\,D_0.$$

aan de cilinder. De lengte L, waarover deze flauw verlopende deformatie zich uitstrekt, is afhankelijk van de cilinderdiameter D en de wanddikte t volgens:

$$L \approx 4{,}5\ \sqrt{Dt}\,.$$

Het drukverschil over de zuiger nu is geconcentreerd in een smalle zone van het zeer dunne olielaagje tussen de zuiger en de cilinderwand. Wij zullen nog zien dat deze zone zich nabij de hogedrukkant (in fig. 16 de rechterkant) van de zuiger bevindt. De werking van de lineaire motor daarentegen berust op het verdringen van olie door de linkerkant van de zuiger. Daar moet de cilinderdeformatie door het drukverschil onmerkbaar zijn, wat inhoudt dat de zuigerlengte minstens gelijk moet zijn aan de deformatielengte L.

De *afdichting van de zuiger*, waarover het drukverschil $p_s - p_1$ staat, vraagt speciale voorzorgen, daar de loopeigenschappen van de zuiger door de afdichting niet slechter mogen worden. Nu is het voor de goede loopeigenschappen van belang dat zuiger en zuigerstang gecentreerd worden in hun geleidingen, omdat zij anders door de hoge druk rondom vast tegen de cilinderwand resp. cilinderkop gedrukt worden zodra zij er contact mee maken. Dit effect wordt in de hydraulica wel „hydro-lock" genoemd [13].

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Met een hydrostatische lagering van zowel de zuiger als de zuigerstang wordt de gewenste centrering verkregen. De vier daartoe op het ronde zuigeroppervlak aangebrachte lagerkamers (in fig. 15 met *Re* aangegeven) worden via vier gelijke weerstanden R_1 verbonden met de ringvormige hogedrukruimte tussen de zuigerstang en de cilinder. Deze lagerkamers stromen niet in de lagedrukruimte links van de zuiger uit [14], maar in een ringkanaal dat tussen de kamers en de hogedrukruimte is aangebracht en via de holle zuigerstang in verbinding staat met de atmosferische druk.

De afdichting van de zuiger wordt daardoor een afdichting tussen de ruimte met de druk p_1 en de lagerkamerdruk p_r. Nu kiezen wij $p_r = \frac{1}{2} p_s$, daar een hydrostatisch lager het gunstigst werkt bij deze verhouding van kamerdruk p_r en voedingsdruk p_s; aangezien ook $p_1 = \frac{1}{2} p_s$ is (zie formule 5), is het af te dichten drukverschil klein.

Met een eenvoudige afdichtring van rubber, zoals b.v. een O-ring, is dit kleine drukverschil, dat onafhankelijk is van het drukniveau, goed af te dichten zonder nadelige invloed op het bewegen van de zuiger. Alleen geeft het positioneren moeilijkheden vanwege de hysteresis van het materiaal, terwijl bovendien de statische wrijving een functie van de tijd is. Zo'n volledig afdichtend element is echter niet nodig indien het drukverschil tussen p_1 en p_r heel klein blijft (kleiner dan 0,01 bar), waardoor er door de lekspleet nauwelijks vloeistof stroomt. Dit nu is bereikt met een drukregelklepje, dat in de zuiger is ingebouwd (zie fig. 16) en een zo grote druk in het uitstroomringkanaal *10* (*groen*) opbouwt dat de gemiddelde kamerdruk (die aanwezig is in het ringkanaal *9* links van de kamers in fig. 16) gelijk is aan de druk $p_s/2$ (*geel*).

Het op 0,1 μm nauwkeurig stilstaan van de zuiger gedurende lange tijd is slechts op bijzondere wijze te bereiken. Deze — voor de bank zeer belangrijke — positie is verkregen door de zuigerstang hydraulisch te klemmen. Hiervoor is de cilinderkop aan de binnenkant verlengd met een dunwandig cilindrisch stuk (*5* in fig. 16). De hoge druk is steeds aanwezig aan de buitenkant van dit cilindrische stuk en het wordt door elastische vervorming om de zuigerstang geklemd indien de druk tussen deze klemcilinder en de zuigerstang laag wordt. De lage druk wordt ingesteld door de beide begrenzende ringgroeven met een door een magneet bediend schakelklepje op atmosferische druk te brengen. Het drukregelklepje in de zuiger, dat de druk in de lagerkamers van de zuiger op $p_s/2$ houdt, zorgt ervoor dat in de geklemde toestand de druk p_1 in de ruimte achter de zuiger niet gaat oplopen of zakken door kleine lekstroompjes.

In fig. 16 is verder te zien dat de cilinder dubbelwandig is uitgevoerd, om de binnencilinder te beschermen en om het olievolume achter de zuiger te omgeven met stromende olie van geregelde temperatuur. De zuigerstang is hol uitgevoerd en voorzien van twee spelingvrije cardankoppelingen met hogedrukdoorvoer. Hierdoor mag de cilinder direct aan de leibaan en de zuigerstang aan de slede bevestigd worden; een uitlijnfout van $\pm 2°$ is nog toelaatbaar. De interne hogedrukdoorvoer verzorgt in plaats van bewegende hogedrukslangen de olietoevoer naar de sleden, en tussen de beide cilinders stroomt daardoor ook bij stilstand voldoende olie om het geheel de temperatuur van de geregelde olie te geven.

Hoofdspil met motor

De rondloopnauwkeurigheid van de hoofdspil wordt bij toepassing van hydrostatische lagers bepaald door de rondheid van de spil zelf en is zelfs beter dan die eigen rondheid. Er is bij voorbeeld een onrondheid van 0,1 μm gemeten aan een proefas, gedraaid op een hoofdspil met een eigen onrondheid van 0,7 μm. De vorm van de lagerbus doet er minder toe. Voor de bank is de hoofdspil cilindrisch zonder uitsteeksels gekozen, omdat die vorm met een lepbewerking tot op ongeveer 0,1 μm rond te maken is.

De beide radiale lagers worden op zodanige afstand *d* (zie *fig. 17*) van elkaar aangebracht dat de kanteling van de hoofdspil in het voorste radiale lager ten gevolge van een buiten de lagers aangrijpende zijdelingse kracht (zie *fig. 18*) zo klein mogelijk is. Deze kanteling

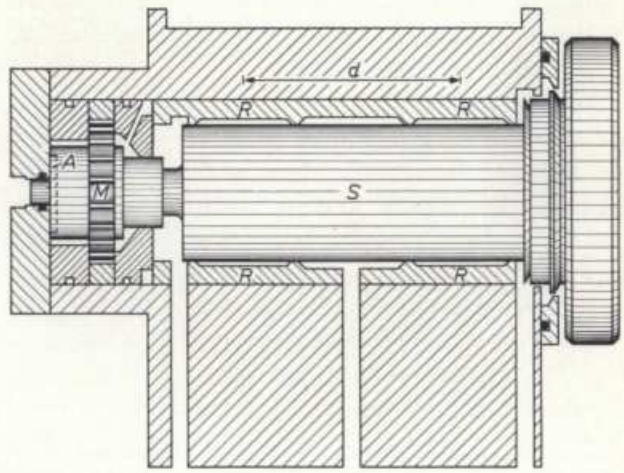

Fig. 17. Doorsnedetekening van hoofdspil *S* en schottenmotor *M*. *A* axiaal lager. *R* radiale lagers.

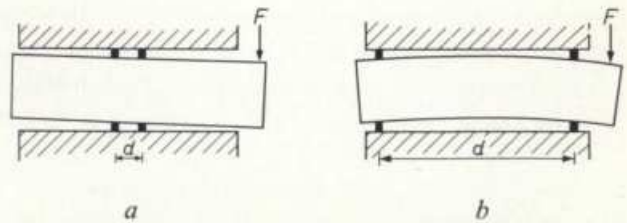

Fig. 18. Een op het uitstekende deel van de hoofdspil uitgeoefende zijdelingse kracht *F* drukt de hoofdspil opzij. Bij een kleine afstand *d* tussen de lagers is een relatief grote uitwijking mogelijk door een kanteling van de gehele hoofdspil (*a*), bij een grote afstand tussen de lagers door buiging van de hoofdspil (*b*). Daartussenin ligt een optimale afstand *d*, waarbij de afwijking minimaal is.

[13] J. Boyd, The influence of fluid forces on the sticking and the lateral vibration of pistons, Trans. ASME, J. appl. Mech. **31**, 397-401, 1964.

[14] Zoals bij A. A. Raimondi en J. Boyd, Fluid centering of pistons, Trans. ASME, J. appl. Mech. **31**, 390-396, 1964.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

is ongewenst omdat daardoor de as van rotatie van het in de spilneus ingeklemde werkstuk van richting verandert. De optimale afstand d is afhankelijk van de elasticiteitsmodulus E, van het lineair traagheidsmoment I van de doorsnede van de hoofdspil en van de lagerstijfheid K volgens:

$$d = \sqrt[3]{c\frac{EI}{K}},$$

waarbij de constante c ongeveer 15 is, wanneer alle grootheden in SI-eenheden zijn uitgedrukt [15].

Het axiale lager of taatslager (A in fig. 17) wordt aan het uiteinde van de hoofdspil S aangebracht en steunt tegen een aan de vaste kop geboute vlakke plaat. Het is een door de voedingsdruk voorgespannen hydrostatisch lager. De constructie is zo uitgevoerd dat het axiale en de radiale lagers elkaar niet beïnvloeden en dat het voorste radiale lager zo dicht mogelijk bij de spilneus ligt, wat gunstig is voor de rondloopnauwkeurigheid en de stijfheid van de hoofdspil. Een nadeel is dat het axiale lager ver van de spilneus afligt, waardoor de axiale positie van het in de hoofdspil ingespannen werkstuk afhankelijk is van de temperatuur van de hoofdspil. Schommelingen hierin zijn echter klein. Dit is te danken aan de wijze waarop het toerental van de hoofdspilmotor geregeld wordt.

Wij hebben op blz. 124 gezien dat dit gebeurt door de stroom door een paralleltak te variëren en tegelijk de som van de stromen door motor en paralleltak constant te houden. Deze constante totale stroom voert, daar ook de druk constant gehouden wordt, een van het toerental onafhankelijk hydraulisch vermogen (druk × volumestroom) aan de vaste kop toe. Dit hydraulisch vermogen wordt deels in de hydrostatische lagers van de motor en de spil door wrijving deels in de debietregelklep van de paralleltak door smoring gedissipeerd. Daarnaast wordt er verspaningsarbeid verricht; wanneer er licht nadraaiwerk op de precisiedraaibank wordt uitgevoerd (spaanafmetingen b.v. 20 × 12 μm) is het hiervoor vereiste vermogen echter verwaarloosbaar. De warmteontwikkeling in de hydrostatische lagers neemt toe met het toerental; omdat het totale gedissipeerde vermogen onafhankelijk van het toerental is, neemt de in de debietregelklep ontwikkelde warmte evenveel af. De van beide paralleltakken afkomstige oliestromen worden nu tussen de beide hoofdspillagers gemengd en de mengstroom, die dus een van het toerental onafhankelijke hoeveelheid warmte aanvoert, omspoelt de hoofdspil. Deze behoudt daardoor bij verschillende toerentallen dezelfde temperatuur.

De hoofdspilmotor is van het schottentype. Met dit type valt een eenparige hoeksnelheid te verwezenlijken; daardoor kan hij direct op de hoofdspil bevestigd worden zonder dat de tussenkomst nodig is van een koppeling waarin afwijkingen van de eenparigheid worden afgevlakt. Ook is voor het kiezen van het toerental geen omschakelbare overbrenging nodig, daar het toerental van de motor continu regelbaar is binnen wijde grenzen, in onze bank tussen 300 en 1200 omw/min. Bovendien is hij radiaal en axiaal hydraulisch gebalanceerd en heeft hij een klein bouwvolume.

Een schottenmotor bestaat uit een rotor met een aantal schotten en een stator (*fig. 19*). In de stator zijn enige kamers, in ons geval twee, aangebracht met een slaghoogte h; zij verlopen concentrisch met de binnendiameter over een booglengte van θ radialen. De kamers gaan met een bepaalde curve over in de resterende stukken van de binnendiameter, die eveneens θ radialen lang zijn. In de kamers gaan de schotten onder invloed van een veer over een afstand h naar buiten. Zij ondervinden daar van de ene kant de voedingsdruk p_s, van de andere kant een lagere druk p_m. Het op het uitstekende deel van het schot werkende drukverschil oefent een kracht op het schot uit. Deze kracht leidt tot een koppel dat de rotor aandrijft. De olietoe- en afvoer vindt plaats op de overgangscurven en er bevindt zich steeds minstens één schot tussen toe- en afvoer.

Bij een hoekverdraaiing φ wordt er door het schot een volume olie V verplaatst:

$$V = hd\frac{D+h}{2}\varphi.$$

Door de symmetrische uitvoering van de motor wordt door het schot in de tegenoverliggende kamer een zelfde volume verplaatst, zodat per radiaal hoekverdraaiing door de motor een volume

$$V_r = hd(D+h)$$

wordt verplaatst, dat het slagvolume per radiaal wordt genoemd. Daar h constant is over de booglengte θ van de kamer, is het verplaatste volume per hoekverdraaiing onafhankelijk van de positie van de rotor, zodat dit type motor theoretisch een eenparige hoeksnelheid ω heeft. Deze wordt bepaald door de toegevoerde oliestroom Φ en de lekstroom Φ_l volgens

$$\omega = \frac{\Phi - \Phi_l}{V_r}.$$

Ondanks geringe afwijkingen is in een ruim werkgebied de lekstroom Φ_l goed te beschrijven als een lineaire functie van het drukverschil $p_s - p_m$. De verandering van Φ_l kan daardoor in de precisiedraaibank met een membraanbelastingcompensator, zoals geruime tijd geleden in dit laboratorium is ontwikkeld voor een lineaire servomotor [16], worden gecompenseerd.

Zodra een schot op het eind van een kamer is aangekomen (zie fig. 19), moet de afdichting door een volgend schot worden overgenomen. Hieruit volgt dat het aantal schotten minimaal gelijk moet zijn aan $2\pi/\theta$. Bij dit aantal schotten echter is er geen enkele overlapping bij de drukovername en treedt er telkens bij de drukovername een storing op. Beter wordt het door meer schotten toe te passen, waardoor enige overlap ontstaat. Ook dan treedt er nog een overnamestoring op, doordat een schot, dat onvermijdelijk enige speling in zijn groef heeft, eerst omklapt voordat het een drukverschil kan opnemen; bovendien wordt dan

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

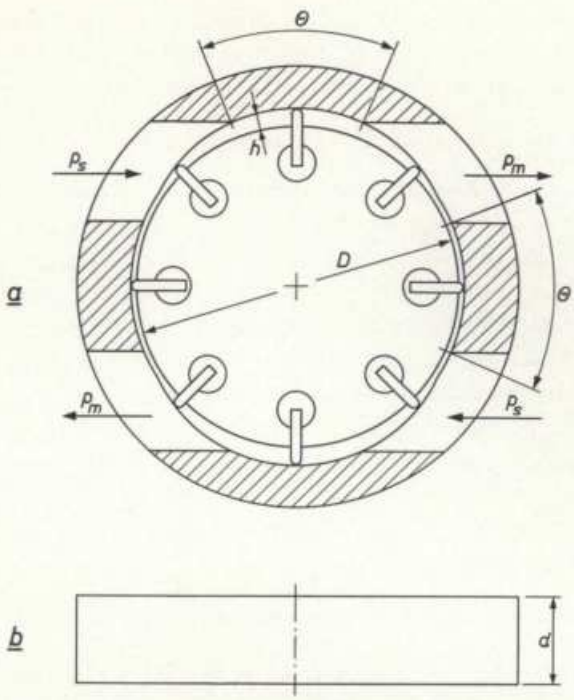

Fig. 19. *a*) Dwarsdoorsnede en *b*) bovenaanzicht van een schottenmotor. p_s druk vóór, p_m druk achter de motor. *h* slaghoogte.

telkens gedurende de korte tijd dat twee schotten in serie staan de lekstroom gehalveerd. Daar komt bij, dat in de beide kamers de drukovername door de opeenvolgende schotten tegelijk plaatsvindt, omdat de rotor radiaal gebalanceerd moet blijven. Bij bewerking van een vlak loodrecht op de as ontstaan hierdoor duidelijk zichtbare onregelmatigheden. Deze storingen zijn op te heffen door het dubbele aantal schotten toe te passen; er dichten dan steeds twee schotten in serie af. Ook dan treden er onregelmatigheden in de lekstroom op, doordat telkens gedurende een korte overlapperiode drie schotten in serie staan. Deze ongelijkmatigheden kunnen worden weggenomen door in het overlapgedeelte van de kamer 20 μm diepe zg. ontlastgroeven aan te brengen, die zoveel extra lek mogelijk maken dat de lekstroom gedurende de overlapperiode gelijk wordt aan die bij afdichting door twee schotten in serie.

De toegepaste motor heeft twee kamers met 18 schotten en een overlap van 10°. De diameter van de rotor is 60 mm, zijn breedte 7 mm en de slaghoogte 2 mm. Bij het maximale toerental van 1200 omw/min is aan de spilneus een vermogen van 250 W beschikbaar. Dit vermogen is zo laag gekozen omdat deze bank alleen maar gebruikt wordt voor nadraaiwerk, en zelfs dit geringe vermogen wordt daarbij maar zelden volledig benut. Zonder bezwaar kan echter, ook bij gelijke afmetingen van de vaste kop, een groter vermogen worden ingebouwd.

De regelkleppen

Er is in het voorgaande verscheidene malen van regelkleppen gesproken, die de taak hadden een druk of een debiet op een voorgeschreven waarde te houden. Het regelen van een debiet is terug te voeren op het regelen van een drukverschil over een vaste stromingsweerstand, zodat in feite alle regelopgaven neerkomen op het regelen van een drukverschil. Dit moet in de precisiedraaibank met de hoge nauwkeurigheid van b.v. 0,1 % gebeuren, terwijl met de gangbare regelkleppen hoogstens een nauwkeurigheid van 1 à 2 % bereikbaar is. Het was dan ook nodig voor de precisiedraaibank regelkleppen te ontwerpen en daarbij bijzondere aandacht te besteden aan alle storende krachten die daarin ten gevolge van vloeistofstromingen of wrijving werkzaam zijn. Onder andere door compensatie van de met de stroming samenhangende krachten en door ook hier gebruik te maken van hydrostatische lagering kon de vereiste precisie bereikt worden.

Een hydraulische regelklep verricht zijn taak door onder invloed van variërende drukniveaus een doorstroomopening meer of minder af te sluiten. Hij bestaat daartoe in de hier beschreven precisiedraaibank altijd uit een bewegende zuiger, die de uitstroompoorten in een cilinder meer of minder afsluit.

Bij het constant houden van een druk zijn nu twee gevallen te onderscheiden. In het eerste geval houdt een drukregelklep de druk *voor* de klep constant; de oliestroom door de klep is dan een nevenstroom. Dit geval is weergegeven in *fig. 20*; de geregelde druk p_c aan de

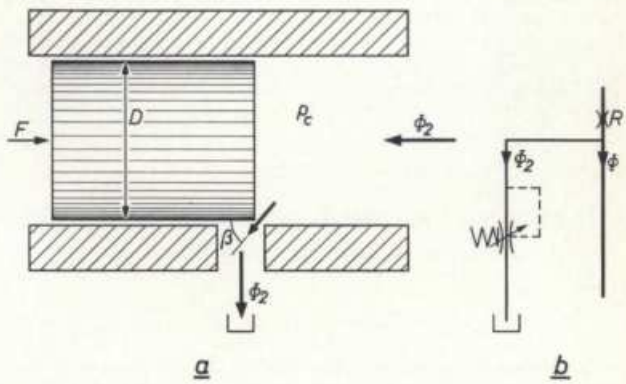

Fig. 20. *a*) Vereenvoudigde doorsnede van een regelklep die de druk *vóór* de klep op een constante waarde p_c houdt. De door p_c op de zuiger uitgeoefende kracht maakt evenwicht met de, meestal aan een veer ontleende, kracht *F*. De door de uitstroompoort wegstromende olie Φ_2 is een nevenstroom, nodig voor de regelwerking. De uitstroomrichting maakt een hoek β met de as van de klep.
b) Schema van de hydraulische schakeling waarin de regelklep is opgenomen. De streeplijn geeft aan dat de druk *vóór* de klep de grootte van de doorstroomopening beïnvloedt. Φ hoofdstroom. *R* inwendige weerstand van de drukbron.

[15] Minimaliseren we niet de kanteling van de hoofdspil maar de zijdelingse uitwijking van de spilneus, dan moet een andere formule worden gebruikt (zie het in [11] aangehaalde artikel).

[16] T. J. Viersma, Investigations into the accuracy of hydraulic servomotors, dissertatie, Delft 1961. De afwijkingen van het voor een laminaire stroming geldende lineaire verband tussen volumestroom en druk ontstaan doordat de vorm van de lekspleet en de temperatuur van de olie, en daarmee zijn viscositeit, van de druk afhangen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

ene zijde van de zuiger maakt evenwicht met een aan een veer ontleende kracht F op de zuiger. Naast de vereenvoudigde doorsnede van de regelklep is in fig. 20 dit geval van drukregeling in schemasymbolen weergegeven. Φ is de hoofdstroom; Φ_2 de nevenstroom. De streeplijn geeft aan dat de druk vóór de klep invloed heeft op de grootte van de doorstroomopening. Het tweede geval is dat van de reductie van een hogere druk tot een constante waarde p_c onafhankelijk van het debiet. Drukregelkleppen voor deze functie, zg. drukreduceerkleppen, worden door de hoofdstroom doorlopen; zij regelen de druk *na* de klep (zie *fig. 21*).

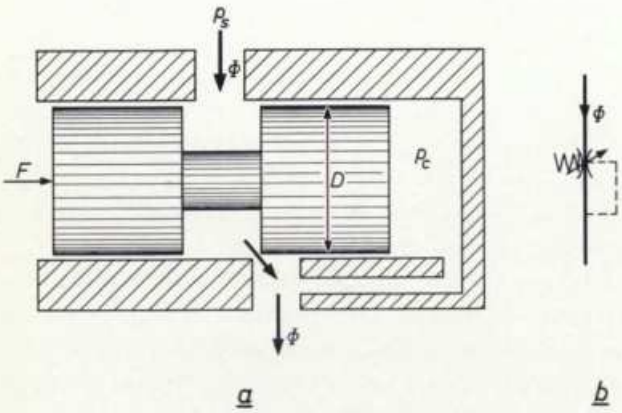

Fig. 21. *a*) Vereenvoudigde doorsnede van een regelklep die de druk *na* de klep op een constante waarde p_c houdt. De door p_c op de zuiger uitgeoefende kracht maakt evenwicht met de, meestal aan een veer ontleende, kracht F. De onder de druk p_s aangevoerde olie oefent geen kracht op de zuiger uit. De hoofdstroom Φ doorstroomt de klep. *b*) Schematische voorstelling van de regelklep. De streeplijn geeft aan dat de druk *na* de klep de grootte van de doorstroomopening beïnvloedt.

Compensatie van de impulskracht

In beide typen van regelklep bestaat er een evenwicht van krachten dat uitgedrukt wordt door de vergelijking:

$$F = \frac{1}{4}\pi D^2 p_c ,$$

waarin D de diameter van de zuiger is. De meetkracht F moet onafhankelijk van de positie van de zuiger en van het door de klep stromende debiet zijn, om de constantheid van de geregelde druk p_c te waarborgen. De kracht F die in werkelijkheid in de klep optreedt bevat echter behalve de aan een veer ontleende component ook een met de vloeistofstroming door de klep variërende component, de impulskracht F_i. Deze kracht, die als een reactiekracht beschouwd kan worden, door de uitstromende vloeistof uitgeoefend op de zuiger in de cilinder, kan tot 20% van de aangebrachte veerkracht F_s bedragen en betekent dus een belangrijke storing in de werking van de regelklep. Wij hebben nu een regelklep geconstrueerd waarin de impulskracht wordt gecompenseerd. Dit is als volgt bereikt.

De impulskracht is evenredig met de per tijdseenheid uitstromende vloeistofmassa $\varrho\Phi$ (ϱ is de soortelijke massa van de vloeistof) en met de axiale component van de snelheid v van uitstromen; in formule:

$$F_i = \varrho\Phi v \cos\beta, \quad \ldots\ldots (7)$$

waarin β de hoek is tussen de richting van uitstromen en de as van zuiger en cilinder (zie fig. 20). Het is mogelijk een compenserende, met Φ evenredige, tegenkracht aan te brengen (zie hieronder), doch een complicatie ontstaat doordat F_i ook nog met v evenredig is. Het blijkt nu dat de invloed van deze evenredigheid juist tegengesteld is aan die van een andere nog niet genoemde afwijking, nl. de variatie van de veerkracht F_s met de plaats van de zuiger, en dat bij een juiste keuze van de veerconstante beide invloeden elkaar in de omgeving van het werkpunt van de klep ongeveer kunnen opheffen.

De veerkracht F_s varieert nl. met een verplaatsing x van de zuiger volgens:

$$F_s = F_{s0} + K_s x, \quad \ldots\ldots\ldots (8)$$

waarin K_s de veerconstante voorstelt en F_{s0} de veerkracht op het punt waarvoor we $x = 0$ stellen. Kiezen we daarvoor de positie waarin de zuiger de uitstroompoorten net afsluit, dan laat x zich uitdrukken in de stroomsnelheid v en het uitstromende debiet Φ. De grootte van de uitstroomopening is xb, als b de breedte van de uitstroompoorten is, en het debiet Φ wordt gegeven door:

$$\Phi = \alpha x b v . \quad \ldots\ldots\ldots (9)$$

Hierin is α een stromingscoëfficiënt; in een groot gebied is α ongeveer gelijk aan 0,7 [17].

De totale kracht F op de zuiger wordt, zoals volgt uit (7), (8) en (9), gegeven door:

$$F = F_{s0} + \Phi\left(\frac{K_s}{\alpha b v} + \varrho v \cos\beta\right).$$

We zien dat in de factor tussen haakjes één term evenredig en één term omgekeerd evenredig met v is. Een dergelijke uitdrukking verandert in een zeker gebied van de onafhankelijk veranderlijke (in dit geval v) betrekkelijk weinig van waarde. Door een juiste keuze van de veerconstante K_s kan dit gebied rondom het werkpunt van de regelklep gelegd worden. Is bij dit werkpunt de uitstroomsnelheid v_0, dan wordt de kracht F bij juiste dimensionering gegeven door:

$$F = F_{s0} + \Phi\cos\beta\left(\frac{v_0^2}{v} + v\right). \quad \ldots (10)$$

Het verloop van de factor tussen haakjes is weergegeven in *fig. 22*. Men ziet daaruit dat de met Φ evenredige storende kracht in de omgeving van het werkpunt bij benadering onafhankelijk van de uitstroomsnelheid v gemaakt is.

Om de impulskracht nu te compenseren, wordt de oliestroom Φ na het doorstromen van de klep door een laminaire weerstand R geleid (zie *fig. 23*, een meer gedetailleerde doorsnedetekening van de drukregelklep waarvan fig. 20 een principeschets geeft). Het drukverval over een laminaire weerstand is evenredig met het erdoor stromend debiet (vergelijk formule (2) die geldt voor de laminaire stroming in een hydrosta-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

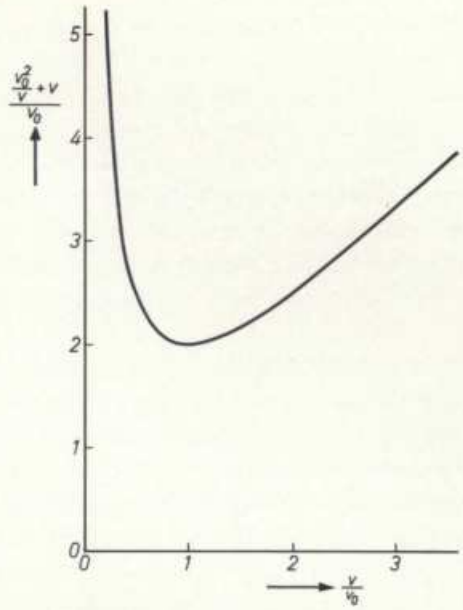

Fig. 22. Het verloop van de uitdrukking $(v_0^2/v + v)$ met v. Het minimum wordt bereikt als $v = v_0$ is; in een zeker gebied rondom dit punt heeft de uitdrukking een nagenoeg constante waarde.

tisch lager) en de door de weerstand R opgebouwde overdruk p is dus evenredig met Φ. Deze zg. compensatiedruk p werkt op een extra zuigervlak met verkleinde diameter d en oefent een kracht uit op de zuiger, die tegengesteld is aan de impulskracht en deze bij juiste dimensionering van R voor iedere waarde van Φ opheft [18]. Een voorbehoud moet hier slechts gemaakt worden in verband met de invloed die de temperatuur heeft op de viscositeit van de olie en daarmee op de grootte van de weerstand R; daardoor is niet altijd een volledige compensatie mogelijk.

Vormgeving van de kleppen

De snelheid waarmee de olie door de uitstroompoorten uittreedt is vrij hoog (b.v. 65 m/s bij een drukverschil van 20 bar). Om de snel stromende olie weer

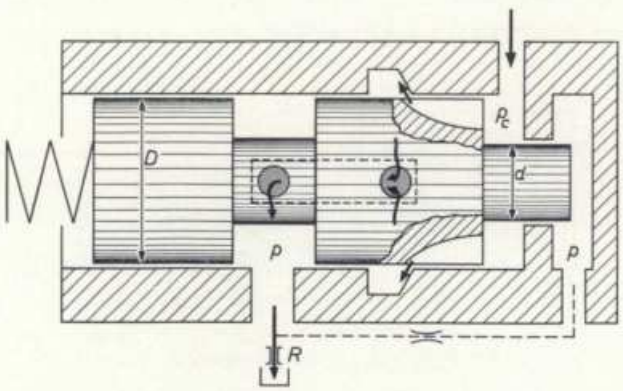

Fig. 23. Meer gedetailleerde doorsnedetekening van de regelklep volgens fig. 20. In de nevenstroom is een vaste laminaire weerstand R opgenomen. De hierdoor opgebouwde druk p werkt op een extra zuigervlak, waardoor een compensatie van de impulskracht wordt verkregen.

tot rust te laten komen, is in de cilinderwand een ringkanaal aangebracht (zie fig. 23). Was dit kanaal rechthoekig van doorsnede, dan zou de vloeistofstroming er een ongewenst patroon van wervels in opwekken [19] en zou de instroomhoek β voortdurend fluctueren. Daarom is de wand waarlangs de olie de groef binnenstroomt onder de in fig. 23 aangegeven hoek van 60° geplaatst; de oliestroom volgt nu de wand [20] en de instroomhoek β wordt gestabiliseerd. Ten einde de vloeistofstroming langs de zuiger beter te definiëren, zijn daarin twee of vier uitstroomgroeven aangebracht. De olie in het ringkanaal stroomt door een ruime boring in de zuiger weg.

De zuigers van de regelkleppen kunnen door „hydro-lock" geklemd raken [21]. Van het steeds aanwezige drukverschil over de zuigers wordt gebruik gemaakt om ze hydrostatisch te lageren, waardoor dit voorkomen wordt. Bovendien wordt hierdoor de bij regelkleppen gebruikelijke nauwkeurigheid van 1 à 2% verbeterd tot 0,1%; een drukregelklepje reageert zelfs reproduceerbaar op een variatie van 10^{-3} bar bij een drukniveau van 10 bar.

Van de afmetingen van de regelkleppen geeft *fig. 24* een indruk. Van een grote en een kleine uitvoering (zuigerdiameter resp. 12 en 6 mm) zijn daarin cilinder en zuiger afgebeeld.

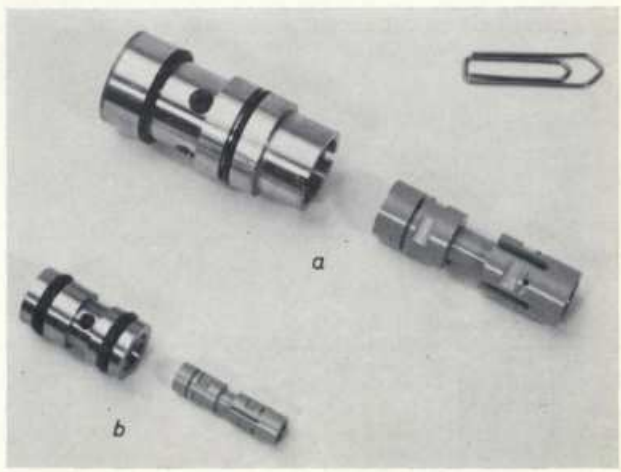

Fig. 24. Zuiger en cilinder van twee in de precisiedraaibank toegepaste regelkleppen. *a*) Grote uitvoering, diameter van de zuiger 12 mm, *b*) kleine uitvoering, diameter 6 mm.

[17] L. Gross, Bestimmung der Durchfluß beiwerte verschiedener Drosselelemente, besonders bei kleinen Druckunterschieden, Ölhydraulik und Pneumatik **12**, 3-8, 1968 (no. 1).

[18] Deze methode is nastelbaar, in tegenstelling tot die beschreven in J. F. Blackburn, G. Reethof en J. L. Shearer, Fluid power control, M.I.T. Technology Press, New York 1960, die gebruik maakt van een speciale vorm van de in de cilinder aangebrachte ruimte waarin de olie uitstroomt en van het zuigerdeel ertegenover.

[19] Zie het in [18] aangehaalde werk, blz. 362.

[20] Dit effect staat in de vloeistoflogica bekend als het Coandaeffect; zie P. E. Russ Henke, Fluidics control: yesterday, today and tomorrow, Electromech. Design, mei 1968, blz. 12.

[21] Dit verschijnsel is in de beschrijving van de lineaire motor op blz. 130 reeds genoemd.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Servogestuurde drukregelklep

De in fig. 23 afgebeelde drukregelklep wordt gebruikt voor het constant houden van de voedingsdruk van de bank (klep *26* in fig. 4). Dank zij het toegepaste systeem van toerenregeling is de oliestroom door de bank en daarmee ook de nevenstroom door de klep steeds ongeveer even groot. Daardoor is deze klep in staat de voedingsdruk nauwkeurig constant te houden.

Grote verschillen in het door de klep stromend debiet treden bijvoorbeeld op bij de regelklep die de center, onafhankelijk van de snelheid waarmee hij zich verplaatst, altijd met dezelfde kracht tegen het werkstuk moet laten drukken (klep *12* in fig. 4). In dit geval is de beschreven compensatie van storende krachten in de regelklep niet voldoende precies en moet, ter vergroting van de nauwkeurigheid, een zg. gestuurde drukregelklep worden gebruikt. Op een dergelijke drukregelklep werkt behalve de beschreven krachten nog een stuurkracht, die in een aparte stuurklep wordt opgewekt.

Een algemeen bekende schakeling van een gestuurde drukregelklep is in *fig. 25a* schematisch weergegeven. De drukregelklep *C* moet, bij zeer verschillende debieten door *C*, de druk p_c op een voorgeschreven waarde houden. Omdat bij een ander debiet de zuiger een andere stand heeft, is een veer niet in staat om een constante meetkracht te leveren. In plaats van een veerkracht wordt daarom een aan een constante druk p_1 ontleende kracht als meetkracht gebruikt. Deze stuurdruk p_1 wordt door de stuurklep *P* constant gehouden. Stuurklep *P* wordt dank zij de meetflens *A* wel door een nagenoeg constante stroom doorlopen en kan daardoor p_1 nauwkeurig constant houden. Men noemt dit regelsystteem een voorgestuurde drukregelklep.

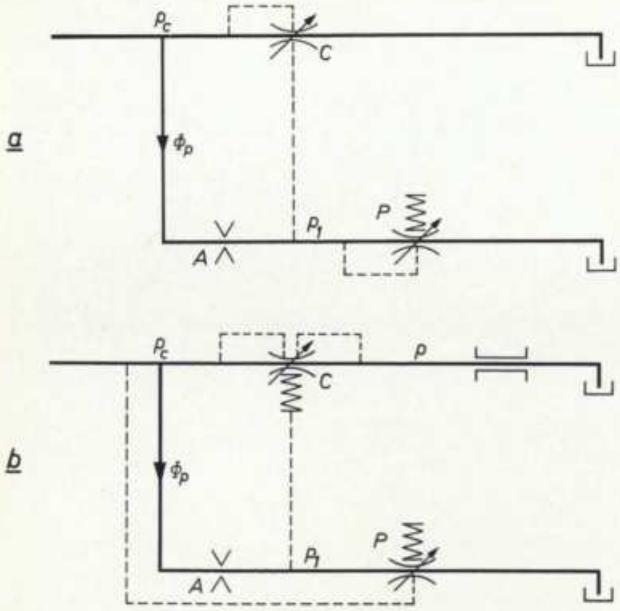

Fig. 25. *a*) Voorgestuurde drukregelklep in gangbare uitvoering. Doordat het debiet door drukregelklep *C* sterk kan variëren en daarmee de stand van de zuiger in de drukregelklep, is een veer niet in staat een constante meetkracht te leveren. Deze wordt nu geleverd door de in de stuurklep *P* constant gehouden stuurdruk p_1. Dank zij de meetflens *A* varieert het debiet door *P* maar weinig en is deze tot een nauwkeurige drukregeling in staat. Impulskrachten in *C* worden niet gecorrigeerd.
b) Servogestuurde drukregelklep zoals in de precisiedraaibank toegepast. Het stuurklepje *P* reageert hier op de te regelen druk p_c en geeft een stuurdruk p_1 af die een corrigerende stuurkracht op drukregelklep *C* uitoefent. Hierdoor worden, in tegenstelling tot (*a*), ook de impulskrachten in *C* gecorrigeerd.

Daar in dit systeem de meetkracht nauwkeurig constant blijft, zullen de bij variërend debiet variërende impulskrachten in *C* tot uiting komen in variaties van p_c, zoals eerder beschreven. Aan dit bezwaar wordt hier tegemoetgekomen door de in de precisiedraaibank toegepaste regelschakeling volgens fig. 25*b*. De stuurklep *P* reageert hierin rechtstreeks op de te regelen druk p_c en wekt daarbij een stuurdruk p_1 op, die regelklep *C* zodanig beïnvloedt dat alle afwijkingen, dus ook die ten gevolge van variërende impulskracht en veerkracht, worden gecorrigeerd. Zo is een teruggekoppeld systeem ontstaan, waaraan de naam „servogestuurde drukregelklep" is gegeven.

Het stuurklepje *P* in fig. 25*b* is in doorsnede voorgesteld in *fig. 26*. De stuurdruk p_1 wordt in de klep geregeld maar oefent zelf geen kracht uit op de zuiger. Dezelfde regelklepjes zijn ook aangebracht in de zuigers van de lineaire motoren van hoofdspil- en beitelhouderslede (zie fig. 16). Daar wordt de meetkracht echter niet geleverd door een veer maar door de voedingsdruk p_s (*rood*) die op een tot de helft verkleind zuigeroppervlak werkt en evenwicht maakt met de halve voedingsdruk $p_s/2$ (*geel*) die werkt op het volle zuigeroppervlak. Het klepje houdt de druk in de lagerkamers *8* op de halve voedingsdruk en verzorgt zo tegelijkertijd hydrostatische lagering en afdichting van de zuiger (zie blz. 131).

Ook via de in fig. 16 *blauw* aangegeven druk is het mogelijk een kracht op het regelklepje uit te oefenen. Deze mogelijkheid kan worden gebruikt voor het aan-

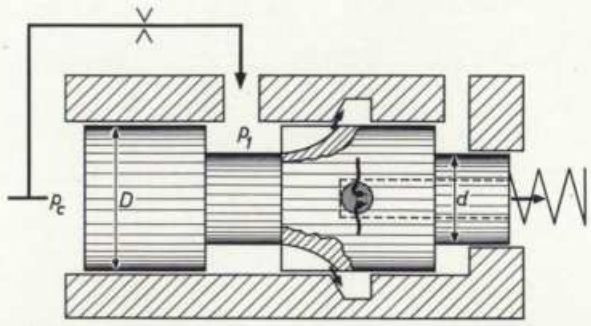

Fig. 26. De stuurklep van de servogestuurde drukregelklep. Afwijkingen in de geregelde druk p_c veroorzaken fluctuaties in de stuurdruk p_1, die corrigerend werken op de drukregelklep. Stuurdruk p_1 oefent zelf geen kracht uit op de zuiger van de stuurklep.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

brengen van een correctie op de geregelde druk indien dit in verband met vervaardigingstoleranties nodig is, en ook om opzettelijk een klein drukverschil over de zuigerspleet te creëren. Dit drukverschil zal tot een zeer zwakke laminaire stroming door de zuigerspleet leiden en tot een constante lage snelheid van de zuiger. Dit beginsel is verder uitgewerkt in een laminaire debietregelklep, die in combinatie met een lineaire motor in Philips' Natuurkundig Laboratorium gebruikt wordt bij het optrekken van kristallen uit een smelt (kristalgroeimethode volgens Czochralski). Een snelheid van 1 μm/s of minder is hiermee gemakkelijk te bereiken [22].

Debietregelklep

Deze laminaire debietregelklep is alleen geschikt voor zeer kleine debieten. Vanaf ongeveer 0,25 cm³/s wordt een turbulente debietregelklep toegepast, die bestaat uit een drukreduceerklep en ermee in serie een weerstand of meetflens waardoor een turbulente stroom vloeit. Ook voor deze grotere debieten zou men een laminaire debietregelklep kunnen construeren, maar het gebruik van een turbulente stroming heeft het voordeel van een geringere temperatuurafhankelijkheid. Immers is bij een turbulente stroming door een opening met oppervlakte A volgens Bernoulli de volumestroom:

$$\Phi = \alpha A \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\varrho}}.$$

Hierin is een α met de insnoering van de stroom samenhangende coëfficiënt; a is dikwijls ca. 0,7[17]. Verder is $p_1 - p_2$ het drukverschil over de opening en ϱ de soortelijke massa van de vloeistof. De laatste varieert slechts weinig met de temperatuur, in tegenstelling tot de viscositeitscoëfficiënt η, die bij een laminaire stroming een rol speelt (zie formule 2).

Alle debietregelkleppen in de precisiedraaibank — gebruikt voor de regeling van het toerental van de hoofdspilmotor en van de snelheden der lineaire motoren — zijn dan ook van het turbulente type. De meetflens met doortocht A is bij de klep ingebouwd

[22] Hierdoor is deze methode een alternatief voor die beschreven in H. von Weingraber, Vorschubeinrichtung für extrem langsame Geschwindigkeiten, Annals C.I.R.P. **11**, 90-95.

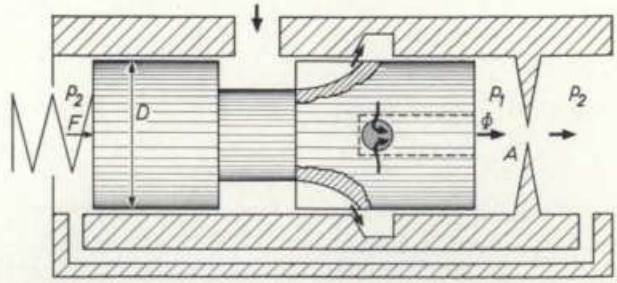

Fig. 27. Debietregelklep. De volumestroom Φ brengt over de meetflens met doortocht A een drukverschil $p_1 - p_2$ teweeg. Dit drukverschil werkt op de zuiger, die er naar streeft het aan een door de veerkracht F voorgeschreven waarde gelijk te houden.

(*fig. 27*). Het drukverschil $p_1 - p_2$ over de meetflens oefent een kracht op de zuiger uit die evenwicht maakt met een veerkracht. Omdat het debiet Φ door de klep constant blijft is hier geen compensatie van de impulskracht nodig; wel moet ook hier een veer van de juiste stijfheid worden ingebouwd in verband met de snelheidsafhankelijkheid van de impulskracht.

In de ontwikkeling en realisatie van de beschreven precisiedraaibank heeft G. H. Veldhuizen van de mechanische ontwerpgroep van dit laboratorium een groot aandeel gehad. De uitwendige vormgeving van de bank is geheel zijn werk.

Samenvatting. Voor eigen gebruik is in Philips' Natuurkundig Laboratorium een precisiedraaibank ontworpen en gebouwd. Alle bewegende delen van deze bank zijn hydrostatisch gelagerd. De bank heeft drie sleden, die door een zuiger en cilinder (een lineaire motor) worden bewogen, de hydrostatische dubbellagers van de sleden hebben een oneindige stijfheid dank zij de terugkoppeling van de lagerdruk naar een membraandubbelrestrictie. De aandrijving van de hoofdspil geschiedt door een hydrostatische schottenmotor. De bank kan werkstukken tot 200 mm rond en lang met een maattolerantie van 1 μm bewerken; de onrondheid van gedraaide werkstukken is kleiner dan 0,1 μm en de bewerkte oppervlakken zijn van optische kwaliteit. De bewerkingskwaliteit is niet van de omgevingstemperatuur afhankelijk; het is alleen vanwege de thermische uitzetting van het werkstuk dat men voor een maatvoering op 1 μm nauwkeurig in een ruimte met constant gehouden temperatuur moet werken. De verplaatsingen van werkstuk en beitel worden met een optisch meetsysteem op 0,5 μm nauwkeurig gemeten en zijn digitaal afleesbaar. Bouw en werking van de belangrijkste onderdelen, met name de hydrostatisch gelagerde sleden, de lineaire motoren, de schottenmotor en de op vele plaatsen voorkomende regelkleppen, worden in het artikel in detail beschreven. De nauwkeurigheid van de kleppen is opgevoerd tot 0,1 %.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De MOS-tetrode

T. Okumura

De tot nu toe beschikbare uitvoeringen van de MOS-transistor hebben een relatief grote terugwerkingscapaciteit. Daardoor zijn ze minder geschikt voor het versterken van signalen van zeer hoge frequentie. In onderstaand artikel wordt een verwant schakelingselement beschreven, dat een veel kleinere terugwerkingscapaciteit heeft en dat bruikbaar is tot frequenties boven 200 MHz. Het is ontwikkeld in het te Takatsuki, Osaka, gevestigde laboratorium van Matsushita Electronics Corporation (MEC), een gezamenlijke onderneming van het Japanse concern Matsushita Electronic Industries (MEI) en het Philips-concern, waarin deze samenwerken op een aantal gemeenschappelijke gebieden van activiteit.

Inleiding

Van de thans bestaande veldeffect- of dunnelagen-transistors is de MOS-transistor (MOS = metal-oxide-semiconductor) het sterkst in opmars. MOS-transistors zijn relatief eenvoudig te maken en paren een grote ingangsweerstand aan zeer gunstige eigenschappen wat de kruismodulatie betreft. Bij toepassing in versterkers voor frequenties van 100 MHz en hoger stuit men echter op moeilijkheden doordat de terugwerkingscapaciteit relatief groot is.

In de buizenelektronica kent men dezelfde moeilijkheid met de triode, welke moeilijkheid daar wordt opgelost door in plaats van een triode een pentode te gebruiken of een zg. cascodeschakeling van twee triodes. Naar analogie van dit laatste wordt in de transistorelektronica gewerkt met een cascode van twee MOS-transistors, waarvan de terugwerkingscapaciteit eveneens veel geringer is dan van een enkele MOS-transistor. Wij hebben nu onderzocht of een goed werkend schakelingselement met nog betere eigenschappen te verkrijgen zou zijn door een cascode van twee MOS-transistors uit te voeren als kristalschakeling [1]. Dit onderzoek is met succes bekroond en heeft een schakelingselement opgeleverd, de MOS-tetrode [2], dat inderdaad een zeer geringe terugwerkingscapaciteit heeft en dat bovendien de gewone MOS-transistor ook op twee andere punten overtreft: in een schakeling met automatische sterkteregeling — met de MOS-tetrode gemakkelijk realiseerbaar, zie hieronder — heeft men met de tetrode een geringere kruismodulatie en een geringere variatie van de ingangscapaciteit met de regelspanning. Ook de stabiliteit van de eigenschappen is uitstekend.

Dr. T. Okumura, medewerker van het researchlaboratorium van Matsushita Electronics Corporation, Takatsuki, Osaka, Japan.

Bij een cascode van radiobuizen (*fig. 1*) worden de twee triodes zo ingesteld dat de roosterstroom zeer gering is; de stroom door beide buizen is dus nagenoeg dezelfde. Zorgt men ervoor dat het rooster G_2 geen wisselspanning kan voeren (ontkoppeling), dan is het gedrag van de schakeling gelijk aan dat van een triode met zeer hoge inwendige weerstand R_t en zeer grote versterkingsfactor μ_t; de steilheid g_{mt} is ongeveer die van een der triodes. In dit geval, dat overeenkomt met de situatie in de MOS-tetrode, geldt [3]:

$$R_t = (\mu_2 + 1)R_1 + R_2 \approx R_1\mu_2, \quad \ldots\ldots (1)$$

$$\mu_t = \mu_1\mu_2 + \mu_1 \approx \mu_1\mu_2, \quad \ldots\ldots (2)$$

en

$$g_{mt} = g_{m1}\frac{\mu_2 + 1}{(\mu_2 + 1) + R_2/R_1} \approx g_{m1}, \quad \ldots\ldots (3)$$

waaruit het bovenstaande direct valt af te leiden.

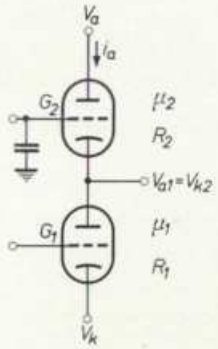

Fig. 1. Cascodeschakeling van radiobuizen (triodes). Deze schakeling kan zo worden ingesteld dat de karakteristieken analoog zijn met die van een enkele triode. De inwendige weerstand en de versterkingsfactor zijn echter veel groter en de terugwerking van anode naar stuurrooster is veel geringer. De steilheid is ongeveer dezelfde.

In *fig. 2* vindt men een schematische doorsnede van een der door ons ontwikkelde uitvoeringsvormen van de MOS-tetrode, naast die van een gewone MOS-transistor (MOS-triode). Zoals men ziet, heeft de tetrode *twee* stuurelektrodes (Engels: gates) G_1 en G_2. Daartussen bevindt zich in het substraat, dat uit silicium van geleidingstype P bestaat, een N-gebied I, het „eiland".

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

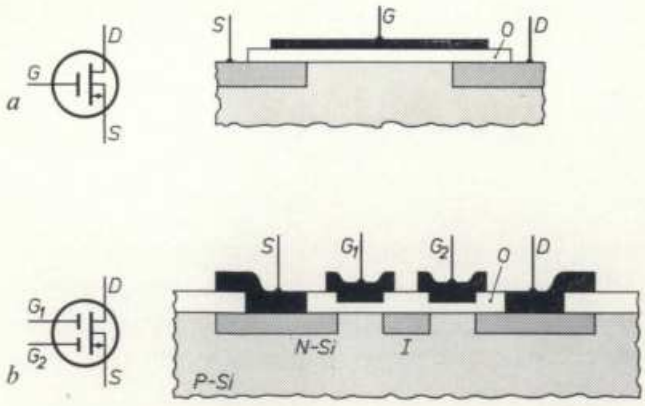

Fig. 2. a) Schematische doorsnede van een MOS-transistor (MOS-triode). *S* toevoerelektrode. *D* afvoerelektrode. *G* metalen stuurelektrode, van de rest geïsoleerd door een dunne oxidelaag *O*. *S* en *D* (donkergrijs) zijn van hetzelfde halfgeleidende materiaal als de rest van het substraat (lichtgrijs), maar zijn van het andere geleidingstype.
b) Schematische doorsnede van een MOS-tetrode op een substraat van *P*-silicium. Tussen *S* en *D* is er een derde *N*-gebied, het eiland *I*. Er zijn nu twee stuurelektrodes, G_1 en G_2. Het geheel is te beschouwen als een geïntegreerde cascodeschakeling van twee MOS-triodes.

Ieder van de beide getekende schakelingselementen heeft nog een substraatcontact, dat gewoonlijk verbonden is met de toevoerelektrode. Links de in schakelschema's gebruikelijke symbolische voorstelling. De pijl stelt de toevoerelektrode voor.

MOS-triode van het in fig. 2*a* getekende type en met een substraat van geleidingstype *P* berust hierop dat er ten gevolge van de positieve (voor)spanning V_g die men de stuurelektrode moet geven, aan het oppervlak van het substraat een laag ontstaat, het zg. kanaal, die van het tegengestelde geleidingstype is als de rest van het substraat (inversie). De ladingsdichtheid van de beweeglijke meerderheidsladingdragers in deze laag hangt af van V_g, en hetzelfde geldt dus voor de stroom I_d die door het kanaal van *S* naar *D* vloeit.

Gaat men na hoe deze stroom bij constante V_g varieert met het potentiaalverschil V_d tussen *D* en *S*, dan vindt men krommen waarvan het eerste deel de vorm van een parabool heeft, en waarvan de rest nagenoeg recht is en bijna horizontaal loopt (*fig. 3a*). In laatstgenoemd gebied heeft de stroom zijn maximumwaarde $I_{d\,sat}$ en is hij nagenoeg onafhankelijk van V_d. De waarde van $I_{d\,sat}$ hangt af van V_g (fig. 3*b*). In deze zg. verzadigingstoestand geldt voor vaste V_d voor het verband tussen I_d en V_g met goede benadering:

$$I_{d\,sat} = \tfrac{1}{2}\beta(V_g - V_{th})^2. \quad . \; . \; . \quad (4)$$

Hierin is $\beta = C\mu/l^2$, waarin *C* de capaciteit is van de

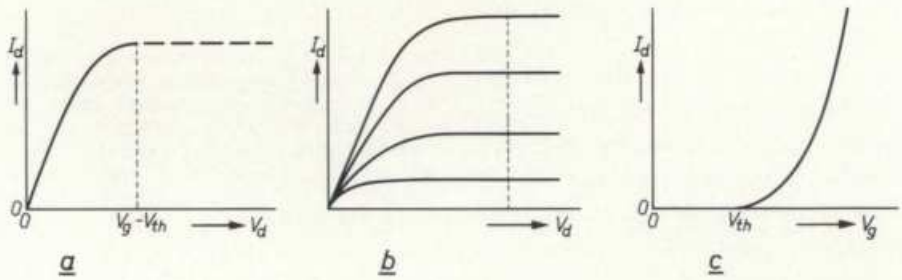

Fig. 3. *a*) De voor een vaste waarde van V_g geldende I_d-V_d-karakteristiek van een MOS-triode. Globaal gesproken bestaat de curve uit een kwadratisch en een lineair, nagenoeg horizontaal verlopend deel. *b*) Schaar van dergelijke krommen, geldend voor verschillende V_g. *c*) I_d-V_g-karakteristiek bij vaste V_d (zie streeplijntje in *b*). De waarde van V_g waarbij een stroom begint te vloeien is de drempelspanning V_{th}.

Het kromme en het rechte deel van de I_d-V_d-karakteristieken sluiten op elkaar aan bij $V_d = V_g - V_{th}$.

Voor de triode gevormd door *S*, G_1 en *I* fungeert het eiland als afvoerelektrode (drain) en voor die gevormd door *I*, G_2 en de afvoerelektrode *D* als toevoerelektrode (source). Het gebied *I* heeft geen aansluitcontact. Het te versterken signaal wordt bij de meeste toepassingen toegevoerd aan G_1; de elektrode G_2 wordt dan capacitief geaard. Het substraat heeft een aansluitcontact (niet getekend), dat verbonden wordt met de toevoerelektrode.

Alvorens de elektrische en technologische bijzonderheden van de door ons ontwikkelde tetrodes te bespreken, recapituleren we enige van de voornaamste eigenschappen van de MOS-triode. De werking van een stuurelektrode ten opzichte van het kanaal, μ de beweeglijkheid van de meerderheidsladingdragers (hier dus de elektronen) en *l* de lengte van het kanaal. V_{th} is de drempelspanning, d.i. de waarde van V_g waarvoor $I_{d\,sat}$ nul wordt. De stroom varieert dus nagenoeg

[1] Zie voor de eigenschappen en de wijze van produktie van kristalschakelingen b.v. A. Schmitz, Philips techn. T. **27**, 152, 1965/66.

[2] Tijdens de ontwikkeling van onze tetrode werd door N. H. Ditrick en M. M. Mitchell een mededeling over soortgelijk werk gedaan tijdens de bijeenkomst van de IEEE Electron Devices Group van oktober 1965.

[3] Zie b.v. G. Klein en J. J. Zaalberg van Zelst, Instrumentele elektronica, uitg. Centrex, Eindhoven 1968, § 18.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

zuiver kwadratisch met V_g (fig. 3c). Uit (4) kan men direct afleiden dat voor de waarde $g_{m\,sat}$ die de steilheid g_m in geval van verzadiging aanneemt, de volgende formule geldt:

$$g_{m\,sat} = (\partial I_{d\,sat}/\partial V_g) = \beta(V_g - V_{th}). \quad . \quad . \quad (5)$$

De steilheid $g_{m\,sat}$ is dus niet onafhankelijk van de potentiaal van de stuurelektrode.

Aan het nagenoeg zuiver kwadratische verband tussen $I_{d\,sat}$ en V_g zijn de goede kruismodulatie-eigenschappen van de MOS-transistor te danken [4]. Is een radio-ontvanger afgestemd op een bepaalde golflengte, dan wordt de modulatie van het ontvangen signaal enigszins beïnvloed door die van andere zenders, vooral wanneer de golflengten slechts weinig verschillen. Dit effect wordt in hoofdzaak bepaald door de derdemachtsterm — en in mindere mate door de hogere onevenmachtstermen — van de ontwikkeling van $I_{d\,sat}$ in een reeks van machten van V_g. Bij de MOS-transistor zijn deze termen zeer klein en is de kruismodulatie dus gering.

MOS-transistors voor toepassing in computers hebben meestal een siliciumsubstraat van geleidingstype N, en dus een kanaal met geleidingstype P. Bij deze transistors heeft V_{th} een zodanige waarde dat ze, wanneer er geen voorspanning op de stuurelektrode staat, niet geleiden, wat voor digitale toepassing meestal vereist is. MOS-transistors voor versterking van elektromagnetische trillingen van hoge frequentie worden daarentegen bij voorkeur op het P-substraat gemaakt. Men heeft dan een kanaal met geleidingstype N, dat hier het geschiktst is daar in silicium de elektronen een ongeveer $3\times$ zo grote beweeglijkheid hebben als de gaten. (Wel is in een door inversie verkregen laag de beweeglijkheid kleiner dan in een massief stuk materiaal van hetzelfde geleidingstype, maar de relatieve vermindering is voor beide soorten ladingdragers ongeveer dezelfde [5].)

De werking van een MOS-tetrode

We willen thans berekenen hoe de stroom die door een MOS-tetrode vloeit afhangt van de diverse potentialen en karakteristieke grootheden. Ofschoon zulks niet geheel gerechtvaardigd is, zullen we doen alsof de tetrode een cascodeschakeling is van twee MOS-triodes, d.w.z. we houden er geen rekening mee dat een tetrode één substraatcontact heeft, dat verbonden wordt met de toevoerelektrode, terwijl de substraten van de twee triodes van een cascodeschakeling ieder verbonden worden gedacht met de eigen toevoerelektrode. Verder veronderstellen we dat de twee triodes identiek zijn, zodat ze b.v. dezelfde β en V_{th} hebben. De potentiaal van het eiland stellen we voor door V_{isl}.

Schrijft men voor de beide triodes een vergelijking volgens (4) op, dan is daar, omdat door beide transistors dezelfde stroom vloeit, direct uit af te leiden:

$$V_{g2} - V_{isl} = V_{g1}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6a)$$

of:

$$V_{isl} = V_{g2} - V_{g1}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6b)$$

en

$$I_{d\,sat} = \tfrac{1}{2}\beta(V_{g1} - V_{th})^2. \quad . \quad . \quad (7)$$

Deze vergelijking voor de verzadigingsstroom van de tetrode is identiek met die van de eerste triode (zie formule 4). In *fig. 4* is schematisch weergegeven hoe de beide triodes zich van geval tot geval instellen (vgl. 6b).

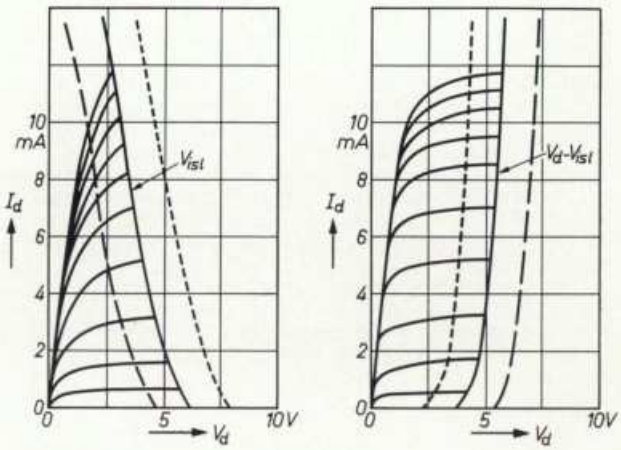

Fig. 4. Instelling van MOS-triodes in cascodeschakeling, links die van de eerste en rechts die van de tweede. De potentiaal van de afvoerelektrode van de eerste, tevens de potentiaal van de toevoerelektrode van de tweede, is V_{isl} genoemd, evenals de eilandpotentiaal van een tetrode. De curven V_{isl} en $V_d - V_{isl}$ gelden voor vaste V_{g2}. Bij een lagere waarde van V_{g2} valt deze curve b.v. ter plaatse van de streeplijn, bij hogere V_{g2} ter plaatse van de stippellijn.

Wanneer V_{g1} groter is dan $V_{isl} + V_{th}$, is de stroom door de eerste triode niet meer verzadigd en geldt daarvoor:

$$I_{d1} = \tfrac{1}{2}\beta\,\{(V_{g1} - V_{th})^2 - (V_{g1} - V_{th} - V_{isl})^2\}. \quad . \quad (8)$$

Uit deze formule en de hiermee analoge formule voor I_{d2} volgt:

$$V_{isl} = \tfrac{1}{2}\,[V_{g1} + V_{g2} - 2V_{th} - \\ -\{(V_{g1} + V_{g2} - 2V_{th})^2 - 2(V_{g2} - V_{th})^2\}^{\frac{1}{2}}] \quad . \quad . \quad (9)$$

en

$$I_d = \tfrac{1}{8}\beta\,[V_{g2} - V_{g1} + \\ + \{(V_{g1} + V_{g2} - 2\,V_{th})^2 - 2(V_{g2} - V_{th})^2\}^{\frac{1}{2}}]^2. \quad (10)$$

We bezien nu enige bijzondere gevallen. Wanneer $V_{g1} = V_{th}$ is, voert de eerste triode juist geen stroom en wordt de potentiaal V_{isl} van het eiland gelijk aan $V_{g2} - V_{th}$; de tweede triode voert dan ook geen stroom. Laat men V_{g1} onbeperkt toenemen, dan gaat V_{isl} blijkens (9) naar nul (d.w.z. V_{isl} wordt gelijk

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

aan V_s) en beweegt I_d zich naar de limietwaarde $\frac{1}{2}\beta(V_{g2} - V_{th})^2$. Dit laatste is bevorderlijk voor de betrouwbaarheid: er kan bij het aanleggen van een hoge stuurspanning niet een zodanig sterke stroom door een tetrode gaan vloeien dat deze beschadigd wordt.

Ten slotte enige opmerkingen over de grootheid waarom het begonnen was, de terugwerkingscapaciteit. Bij de MOS-triode ontstaat terugwerking doordat de stuurelektrode de afvoerelektrode enigszins overlapt (*fig. 5a*). Bij de tetrode is de hoofdoorzaak hierin gelegen dat met iedere wisselspanning op D een (veel kleinere) wisselspanning op I correspondeert, die weer terugwerkt op G_1 (fig. 5*b*). De rechtstreekse beïnvloeding van de potentiaal van G_1 door die van D is gering, daar G_2 als schutelektrode fungeert, althans wanneer de weerstand in de leiding die naar G_2 voert niet te groot is (fig. 5*c*).

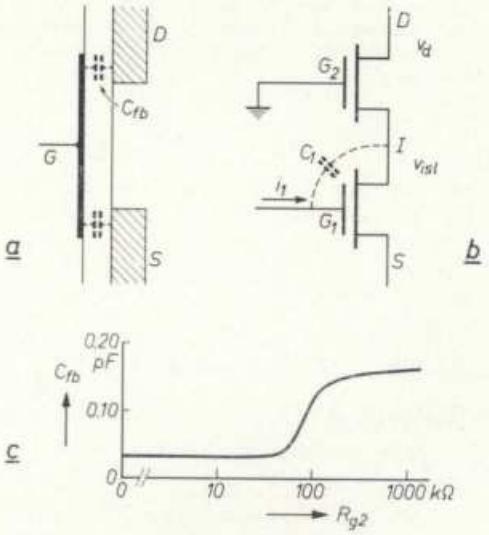

Fig. 5. *a*) In een MOS-tetrode worden kleine parasitaire capaciteiten tussen G en resp. D en S veroorzaakt doordat G de beide andere elektrodes enigszins overlapt. De parasitaire capaciteit C_{fb} tussen G en D is verantwoordelijk voor de terugwerking. *b*) Ter berekening van de terugwerkingscapaciteit van een MOS-tetrode. *c*) De terugwerkingscapaciteit C_{fb} als functie van de weerstand R_{g2} in de toevoerleiding van de tweede stuurelektrode. Is deze weerstand groter dan enige tientallen kΩ, dan gaat het voordeel dat men met een tetrode hebben kan ten dele verloren.

De terugwerking via het eiland kan men als volgt berekenen (fig. 5*b*). Stelt men de terugwerkingscapaciteit van de tetrode voor door C_{fb} en de door een op V_d gesuperponeerde wisselspanning v_d in G_1 geïnduceerde wisselspanning door i_1, dan geldt:

$$i_1 = -j\omega C_{fb}\, v_d = -j\omega C_1 v_{isl}, \quad \ldots\ldots \quad (11)$$

ofwel

$$C_{fb} = C_1\, v_{isl}/v_d. \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (12)$$

Daar door beide delen van de tetrode dezelfde stroom vloeit, is v_{isl}/v_d gelijk aan het quotiënt van R_1 en de totale weerstand van de cascodeschakeling, die gelijk is aan $R_1(1 + \mu_2) + R_2$, en dus geldt:

$$C_{fb} = C_1 \frac{R_1}{R_1(1 + \mu_2) + R_2} \approx C_1/\mu_2. \quad \ldots \quad (13)$$

Bij de MOS-tetrode is de terugwerkingscapaciteit dus ongeveer een factor μ_2 maal zo klein als bij de triode.

Gaat men experimenteel na of V_{isl}, zoals formule (6) eist, gelijk wordt aan $V_{g2} - V_{th}$ als men V_{g1} de waarde V_{th} geeft, dan vindt men een vrij grote afwijking. Met de triodes waarvoor de karakteristieken van fig. 3 gelden en waarvoor $V_{th} = -2{,}7$ V is, vonden we bij $V_{g2} = 5$ V voor V_{isl} de waarde 6,2 V, tegen een berekende waarde van 7,7 V. De discrepantie bleek veel geringer te zijn bij gebruik van triodes die waren gemaakt op een veel minder sterk gedoteerd siliciumsubstraat (20 Ωcm). Dit is in overeenstemming met een berekening van Van Nielen en Memelink [6], waaruit men kan afleiden dat er in het geheel geen discrepantie zal optreden bij transistors die zijn aangebracht op een intrinsiek substraat.

Enige bruikbare configuraties

In *fig. 6* is de doorsnede geschetst van twee van de door ons gemaakte experimentele MOS-tetrodes, die in alle opzichten aan de verwachtingen bleken te voldoen.

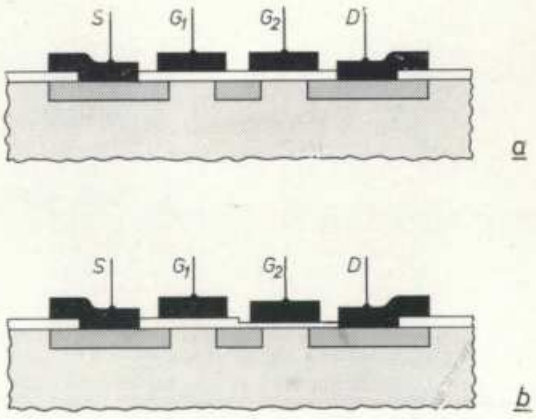

Fig. 6. Schematische doorsnede van twee experimentele MOS-tetrodes. Bij de onderste is de oxidelaag van de tweede triode dunner dan bij de eerste, wat een nog kleinere terugwerkingscapaciteit oplevert en ook gunstig is voor automatische sterkteregeling via G_2.

De in fig. 6*a* geschetste configuratie is zeer eenvoudig en behoeft nauwelijks toelichting. In die van fig. 6*b* is de oxidelaag niet overal even dik zoals men ziet. Daardoor geldt voor de beide triodes niet dezelfde waarde van C; deze is immers omgekeerd evenredig met de dikte van

[4] Voor een beschouwing hierover zie P. E. Kolk en I. A. Maloff, Electronics **37**, 14 dec. 1964, blz. 71.
[5] O. Leistiko, A. S. Grove en C. T. Sah, IEEE Trans. **ED-12**, 248, 1965.
[6] J. A. van Nielen en O. W. Memelink, The influence of the substrate upon the DC characteristics of silicon MOS transistors, Philips Res. Repts. **22**, 55-71, 1967.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

de oxidelaag. Voor de tetrode van fig. 6*b* is C voor de tweede triode groter dan voor de eerste en dientengevolge is, naar men kan afleiden, ook de versterkingsfactor μ_2 groter. Hieruit volgt dat C_{fb} voor deze configuratie nog kleiner zal zijn dan voor die van fig. 6*a*. Verder kan men bij gebruik van deze tetrode voor automatische sterkteregeling met een lagere signaalspanning op G_2 volstaan. Evenals bij andere tetrodes is de kruismodulatie bij zg. terugregeling met V_{g2} (zie hieronder) geringer dan bij terugregeling met V_{g1}, zodat deze configuratie een aantal aantrekkelijke eigenschappen heeft.

Een variant van de in fig. 6*a* getekende tetrode is thans in produktie (MOS-tetrode 3 SK 32). De eigenschappen ervan zullen hieronder besproken worden; een schematische doorsnede en de wijze van produktie vindt men in *fig. 7*. De veranderingen ten opzichte van de doorsnede van de tetrode van fig. 6*a* zijn aangebracht om het effect van de overlapping van S, I en D door de twee stuurelektrodes zoveel mogelijk te reduceren. *Fig. 8* is een microfoto van het oppervlak van een siliciumplaatje waarop een tetrode volgens fig. 7*f* is aangebracht.

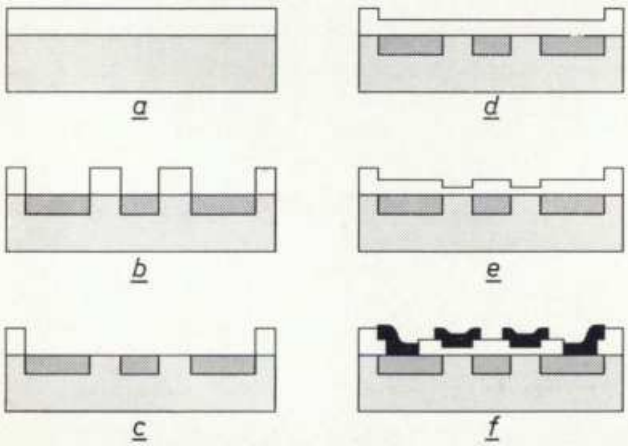

Fig. 7. Stappen voor de vervaardiging van de MOS-tetrode 3 SK 32. *a*) Oxidatie van siliciumsubstraat. *b*) Oxide wegetsen volgens bepaald patroon en fosfor in het silicium laten diffunderen ter verkrijging van toevoerelektrode, eiland en afvoerelektrode. *c*) Verwijdering van de oxidelaag. *d*) Tweede oxidatie en wegetsen van het oxide tussen S, I en D. *e*) Derde oxidatie. *f*) Oxide verwijderen boven gedeelte van S en D en opdampen van aluminium.

Behalve met de twee configuraties van fig. 6 is ook nog geëxperimenteerd met twee andere. Een daarvan is gelijk aan die van fig. 6*a*, met weglating van het eiland. Dergelijke tetrodes bleken niet goed te werken; de potentiaal van het tussen G_1 en G_2 gelegen oxide verandert wanneer V_{g1} of V_{g2} verandert, maar met een zeer grote tijdconstante. De geleiding van het kanaal wordt op die plaats dus niet ondubbelzinnig door V_{g1} en V_{g2} bepaald.

De vierde configuratie die we hebben onderzocht [7] is geschetst in *fig. 9*. Hierin is de oxidelaag van de tweede triode dikker dan die van de eerste. Voor de tweede triode is V_{th} daardoor hoger dan voor de eerste, hetgeen betekent dat zelfs bij $V_{g2} = 0$ de eilandpotentiaal V_{isl} vrij hoog is, ofwel: dat bij $V_{g2} = 0$ de stroom I_d zo sterk is dat men een redelijk grote steilheid verkrijgt.

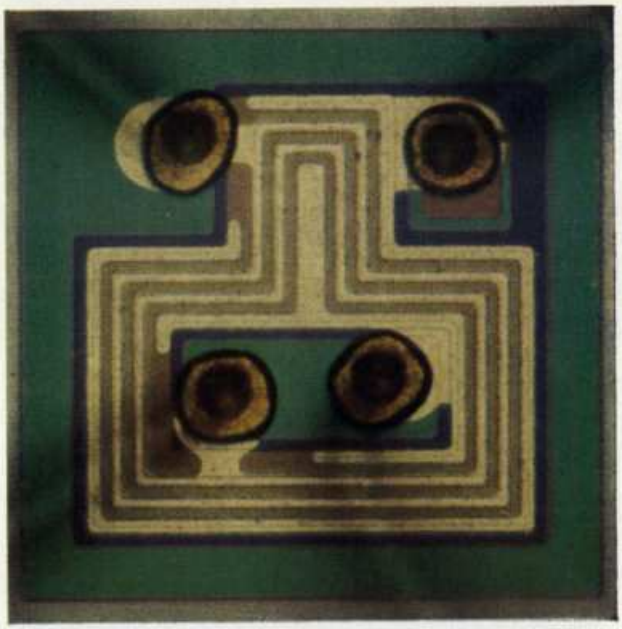

Fig. 8. Microfoto van een siliciumplaatje waarop een MOS-tetrode 3 SK 32 is aangebracht. De gele lijnen zijn (van buiten naar binnen) de toevoerelektrode, de eerste stuurelektrode, de tweede stuurelektrode en de afvoerelektrode. De vier stippen zijn de aansluitingen. De vier toevoerdraden zijn onscherp afgebeeld, maar toch enigszins zichtbaar.

De Matsushita VHF-MOS-tetrode 3 SK 32

De MOS-tetrode 3 SK 32 waarvan de configuratie zojuist werd besproken (fig. 7 en 8) is bestemd voor het VHF-gebied (30 tot 300 MHz) en wordt hermetisch afgesloten gemonteerd in een standaardhuls TO-72. De I_d-V_d-karakteristieken van een exemplaar van dit type vindt men weergegeven in *fig. 10*. De waarde van V_{th} is voor beide triodes gelijk en ligt nu in de buurt van 0,6 V. Bij $V_{g1} = 0$ is de verzadigingswaarde van I_d ongeveer 1 mA, zodat voor de meeste toepassingen een zekere voorspanning op G_1 wenselijk zal zijn (enhancement mode operation).

Ingeval men $V_d = 0$ kiest en V_{g1} en V_{g2} zo sterk negatief maakt dat er geen stroom door de tetrode vloeit ($V_{g1} = V_{g2} = -10$ V), dan is bij een frequentie van 455 kHz voor kleine signalen de ingangscapaciteit

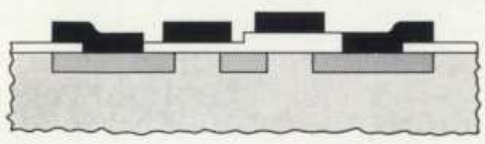

Fig. 9. Experimentele MOS-tetrode waarvan niet de eerste maar de tweede triode een relatief dikke oxidelaag heeft.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

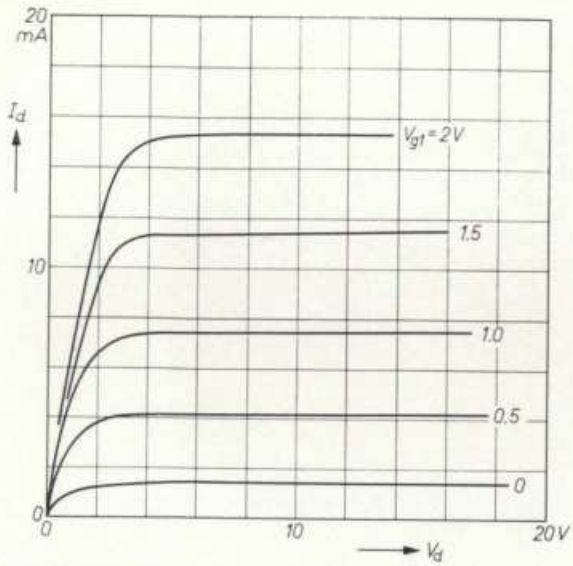

Fig. 10. Schaar van I_d-V_d-karakteristieken van de MOS-tetrode 3 SK 32 voor het geval $V_{g2} = 5$ V. Bij $V_{g1} = 0$ is I_d ongeveer 1,5 mA.

4,5 pF en de uitgangscapaciteit 3 pF. Het gedrag van de terugwerkingscapaciteit C_{fb} als functie van I_d vindt men geschetst in *fig. 11*. Behalve voor zeer kleine I_d is C_{fb} ca. 0,02 pF. In het algemeen is C_{fb} niet groter dan ongeveer 0,035 pF.

In *fig. 12* is weergegeven hoe de steilheid varieert met V_{g1}, met V_{g2} als parameter. Zoals men ziet, vertonen alle curven een maximum, hetgeen betekent dat S met toenemende V_{g1} zowel kan toe- als afnemen. Vermindering van V_{g2} leidt altijd tot een vermindering van S. Er zijn dus in principe drie mogelijkheden van automatische versterkingsregeling: twee door middel van V_{g1} en een door middel van V_{g2}. Van deze drie is die via G_1, waarbij V_{g1} zodanig gekozen wordt dat men zich in het dalende stuk van de kromme bevindt (terugregeling), het meest attractief omdat men dan de mate waarin S met V_{g1} varieert binnen zekere grenzen vrij kan kiezen; men hoeft daarvoor V_{g2} slechts op een geschikte waarde in te stellen. Het feit dat men bij deze wijze van regelen met een vrij hoge V_{g1} moet werken, zodat ook I_d een nogal hoge waarde heeft, is een nadeel.

In *fig. 13* is weergegeven hoe de vermogensversterking P en het ruisgetal F van de tetrode 3 SK 32 bij de frequentie 200 MHz bij drie waarden van V_{g2} afhangen van I_d. Voor nog hogere waarden van V_{g2} worden curven gevonden die bijna samenvallen met die voor $V_{g2} = 5$ V. Zoals men ziet, is onder normale gebruiksomstandigheden bij optimale aanpassing de vermogensversterking bij 200 MHz ruim 20 dB.

[7] Zie ook: Electronics **39**, 16 mei 1966, blz. 212.

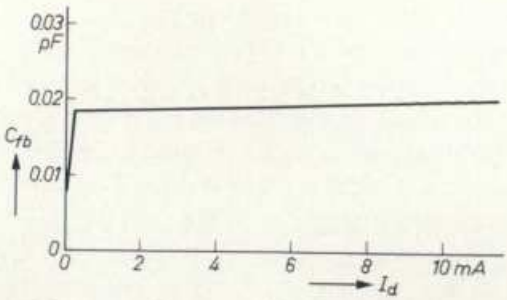

Fig. 11. De terugwerkingscapaciteit C_{fb} van de tetrode 3 SK 32 als functie van I_d bij een frequentie van 455 kHz voor het geval $V_d = 10$ V en $V_{g2} = 5$ V.

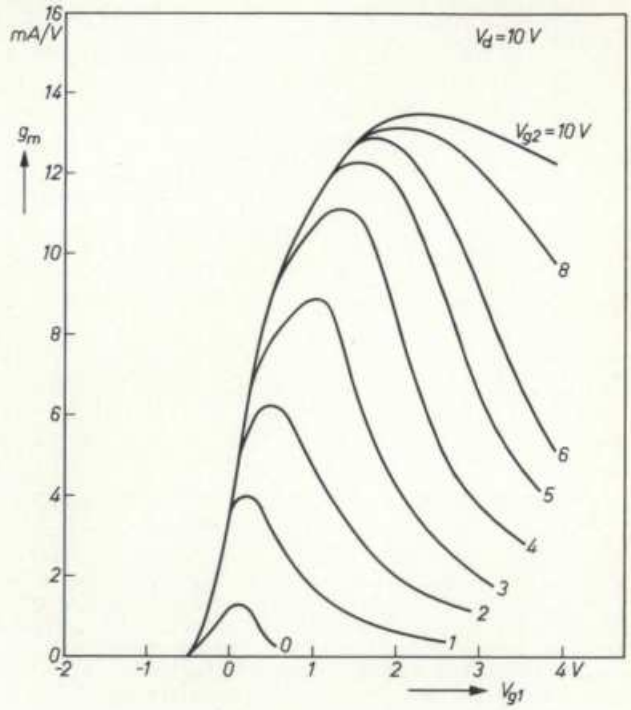

Fig. 12. De steilheid g_m van de tetrode 3 SK 32 als functie van V_{g1} voor negen verschillende waarden van V_{g2} en bij $V_d = 10$ V.

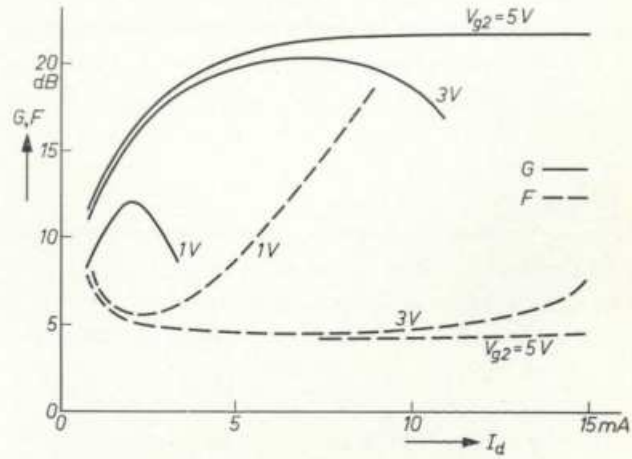

Fig. 13. De vermogensversterking G (getrokken lijnen) en het ruisgetal F (streeplijnen) van de tetrode 3 SK 32, gemeten bij 200 MHz, als functie van I_d. Beide grootheden zijn gemeten onder de gunstigste omstandigheden en met een bandbreedte van 4 MHz.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

In *fig. 14* vindt men kruismodulatiekarakteristieken voor schakelingen waarin twee wijzen van automatische sterkteregeling zijn gerealiseerd. De krommen zijn verkregen met een niet-afgestemde schakeling waaraan een signaal met een draaggolffrequentie van 200 MHz en een tweede signaal met een draaggolffrequentie van 212 MHz werden toegevoerd. Men ziet dat voor normale waarden van I_d een kruismodulatie van 1 % ontstaat als het stoorsignaal 0,1-1 V bedraagt en dat het geval met vaste V_{g1} het gunstigst is.

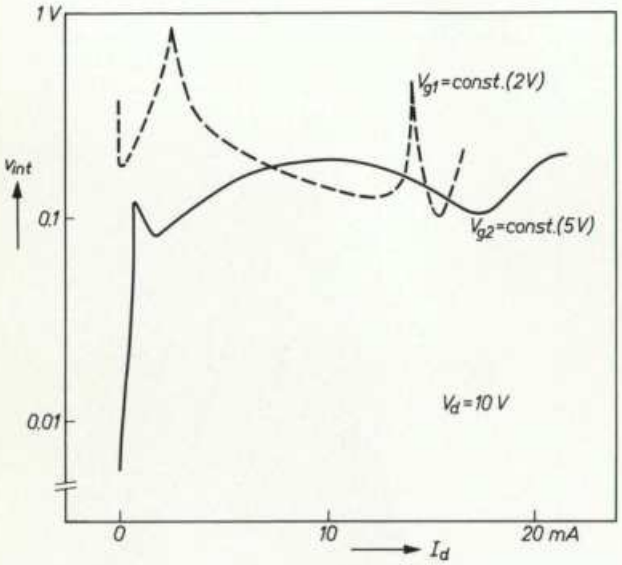

Fig. 14. Het stoorsignaal v_{int} (frequentie 212 MHz) dat in de tetrode 3 SK 32 bij $V_d = 10$ V een kruismodulatie van 1 % teweegbrengt in een signaal met een frequentie van 200 MHz, uitgezet tegen de afvoerstroom I_d. De getrokken lijn geldt voor vaste V_{g2} — een geval dus waarbij de tetrode op de normale wijze bestuurd wordt via G_1 —, de streeplijn voor vaste V_{g1}.

Bij MOS-triodes en -tetrodes is de ingangscapaciteit C_i niet geheel onafhankelijk van de aangelegde spanningen. Daar deze capaciteit mede de afstemming van een kring kan bepalen, is het wenselijk dat de variatie van C_i zo gering mogelijk is. In *fig. 15* vindt men weergegeven hoe C_i varieert met I_d, waarbij I_d gestuurd wordt hetzij via V_{g1} hetzij via V_{g2}. Men ziet dat de situatie waarbij V_{g1} constant gehouden wordt, de gunstigste is. Wat dit aspect betreft, is automatische sterkteregeling via G_1 dus te prefereren.

Daar zowel de beweeglijkheid van de ladingdragers als de potentiaal V_{th} van de temperatuur afhangen, zijn bij vaste V_d, V_{g1} en V_{g2} ook de stroom en de steilheid enigszins afhankelijk van de temperatuur. Het is daarbij mogelijk dat beide invloeden elkaar juist compenseren. Uit (4) en (5) kan men, als men β vervangt door $\alpha\mu$, gemakkelijk afleiden dat voor de beide temperatuurcoëfficiënten geldt:

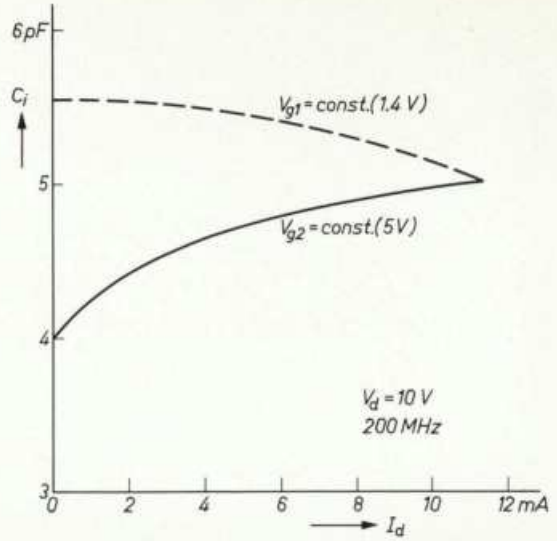

Fig. 15. De ingangscapaciteit C_i van de tetrode 3 SK 32 bij een frequentie van 200 MHz als functie van de stroom I_d voor constante V_{g2} (5 V) resp. constante V_{g1} (1,4 V) en bij $V_d = 10$ V. Bij constante V_{g1} is C_i het minst afhankelijk van I_d.

$$\frac{\partial I_{d\,sat}}{\partial T} = \frac{I_{d\,sat}}{\mu}\frac{\partial \mu}{\partial T} - \sqrt{2\alpha\mu I_{d\,sat}}\,\frac{\partial V_{th}}{\partial T}, \quad . \quad (14)$$

$$\frac{\partial g_{m\,sat}}{\partial T} = \frac{g_{m\,sat}}{\mu}\frac{\partial \mu}{\partial T} - \alpha\mu\frac{\partial V_{th}}{\partial T}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (15)$$

In *fig. 16* is weergegeven hoe I_d varieert met de temperatuur van het kanaal bij $V_d = 10$ V en $V_{g2} = 5$ V. Voor $V_{g1} = 0$ V (ofwel $I_d = 1{,}5$ mA) is de invloed van de temperatuur vrijwel nihil, voor $V_{g1} < 0$ is de temperatuurcoëfficiënt positief maar zeer klein, voor $V_{g1} > 0$ negatief. Dit laatste is weer gunstig uit het oogpunt van beveiliging. (Bipolaire transistors missen

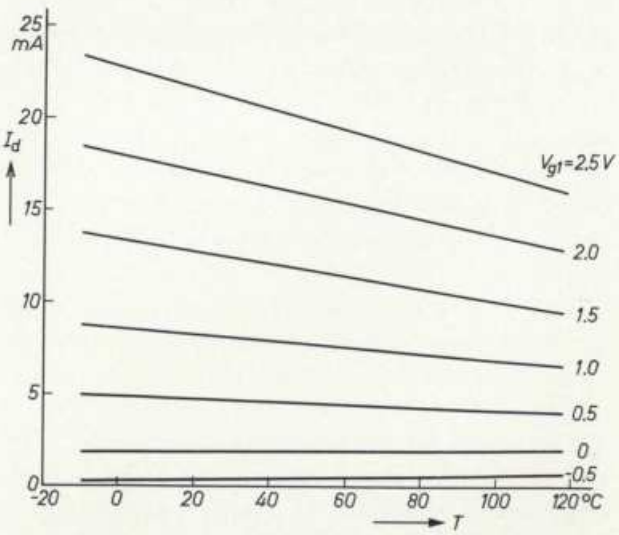

Fig. 16. Variatie van I_d met de temperatuur van het kanaal bij $V_d = 10$ V en $V_{g2} = 5$ V voor een aantal waarden van V_{g1}. Bij kleine V_{g1} is I_d nagenoeg onafhankelijk van de temperatuur.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

deze eigenschap; ook is de stroom daar in sterker mate afhankelijk van de temperatuur dan bij MOS-transistors.)

Evenals bij andere MOS-transistors is ook bij onze tetrode V_{th} niet volkomen constant. In *fig. 17* ziet men hoe bij vier onderzochte exemplaren V_{th} zich in een periode van 1000 uur gedroeg. In het begin was er een relatief snelle, zij het niet grote, verandering (ca. 0,05 V in 150 uur), daarna bleef V_{th} voor alle vier nagenoeg constant.

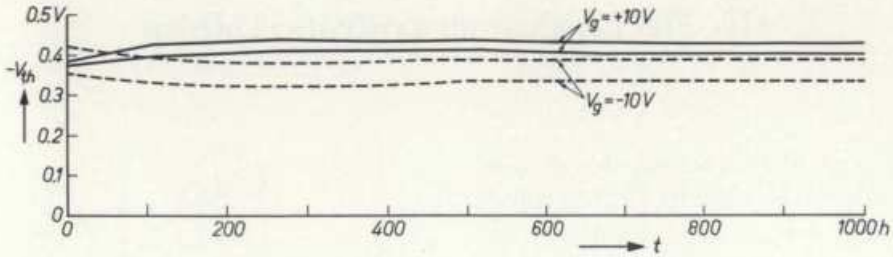

Fig. 17. Variatie met de tijd, gemeten over 1000 uur bij een temperatuur van 150 °C, van de drempelspanning V_{th} van vier exemplaren van de tetrode 3 SK 32. Bij de proeven was steeds S met D verbonden en G_1 met G_2. De spanning tussen beide paren elektrodes was steeds 10 V, maar twee aan twee met verschillende polariteit.

Samenvatting. De MOS-tetrode, een als geïntegreerde schakeling uitgevoerde cascode van twee MOS-triodes, is ontwikkeld om de terugwerkingscapaciteit klein te maken en aldus met een MOS-schakeling in het VHF-gebied door te dringen. De steilheid is ongeveer die van een MOS-triode, de versterkingsfactor en de inwendige weerstand zijn zeer hoog. Bij normaal gebruik heeft de stuurelektrode G_2 van de tweede triode een vaste potentiaal (b.v. 0) en bestuurt men de tetrode via G_1. Bij de door Matsushita Electronics Corporation ontwikkelde VHF-tetrode 3 SK 32 is de drempelspanning V_{th} ongeveer −0,6 V; bij $V_{g1} = 0$ is de stroom I_d ongeveer 1,5 mA, zodat voor sommige toepassingen een zekere voorspanning vereist is. De vermogensversterking is bij 200 MHz ruim 20 dB. De steilheid (ca. 10 mA/V) vertoont als functie van V_{g1} een maximum en hangt ook van V_{g2} af, zodat drie manieren van automatische sterkteregeling mogelijk zijn. De terugwerkingscapaciteit is ca. 0,02 pF. De kruismodulatie-eigenschappen zijn zeer goed. Bij kleine V_{g1} is I_d vrijwel onafhankelijk van de temperatuur. Gedurende de eerste 150 uur van de levensduur verloopt V_{th} enige tienden volts, daarna nauwelijks meer.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Stoechiometrie

W. Albers en C. Haas

III. Het bepalen van existentiegebieden

In deel I is reeds aangestipt dat halfgeleiders en isolatoren doorgaans smalle en verbindingen met metallisch gedrag vaak brede existentiegebieden vertonen [*]. Een beschouwing van de elektronenenergieën maakt dit verschil tussen halfgeleiders en metalen begrijpelijk. Als voorbeeld beschouwen we het oplossen van eigen atomen *A in een verbinding AB. De opgeloste eigen atomen zijn vaak geïoniseerd, b.v. als donor volgens $*A \rightleftarrows *A^+ + e$. Als de ionisatie volledig is (d.w.z. de ionisatie-energie $E_d < kT$) bestaat de oplosenergie $E(A)$ van A in AB uit twee termen, met name een term $E(*A^+)$ voor de inbouw van $*A^+$, en een term $E(e)$, die de energie van het elektron aangeeft: $E(A) = E(*A^+) + E(e)$. Hoe groter de totale oplosenergie $E(A)$ is, des te smaller is het existentiegebied (zie fig. 4 en 5 in I). Een grote waarde van $E(e)$ zal dus in het algemeen leiden tot een smal existentiegebied.

Van de elektronenenergie $E(e)$ kan een indruk verkregen worden door de relatieve posities van de verschillende elektronentoestanden te beschouwen. De relevante toestanden in halfgeleidende of isolerende verbindingen bestaande uit atomen met gevulde binnenschillen (b.v. CdTe, GaAs, Al_2O_3, H_2O, enz.) worden weergegeven in *fig. 12b*. Elkaar overlappende s- en p-banen vormen een brede lege geleidingsband (de breedte ΔE_c bedraagt enkele tientallen elektronvolts) en een brede gevulde valentieband, gescheiden door een verboden energiezone met een breedte ΔE_g van de orde 1 eV. Als A in de geïoniseerde vorm $*A^+ + e$ oplost, worden elektronen in de geleidingsband gebracht. In halfgeleiders met een grote bandafstand ΔE_g zal dan $E(e)$ groot zijn, en verwacht men in het algemeen een smal existentiegebied. Bovendien zal bij toevoegen van grotere hoeveelheden *A het Fermi-niveau in de geleidingsband snel stijgen, zodat $E(e)$ ook nog sterk toeneemt met de concentratie van de opgeloste atomen.

Het is ook mogelijk dat de opgeloste eigen atomen *A zich in de halfgeleider AB weliswaar als donors gedragen, maar slechts voor een klein deel zijn geïoniseerd, omdat $E_d > kT$. In dit geval bevinden de elektronen zich in donorniveaus, die tussen de valentieband en de geleidingsband liggen, en moet voor $E(e)$ niet de energie van de geleidingsband, maar die van het donorniveau zelf genomen worden. Als het donorniveau hoog ligt zal ook in dit geval de elektronenenergie $E(e)$ een belangrijke bijdrage tot de totale oplosenergie leveren en daardoor leiden tot smalle existentiegebieden.

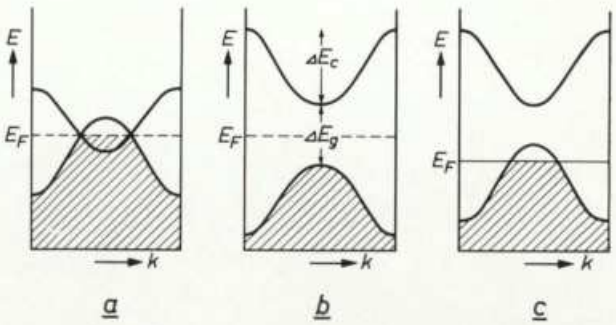

Fig. 12. Elektronenenergieschema's voor metalen (*a* en *c*) en voor een halfgeleider (*b*). k golfvector. E_F Fermi-niveau. ΔE_c breedte geleidingsband. ΔE_g breedte verboden energiezone. De horizontale getrokken lijn in *c* representeert een gelokaliseerd niveau of een smalle energieband (waarvan de breedte ΔE_c, die b.v. 0,1 eV bedraagt, niet is aangegeven).

Bij verbindingen met metallische geleiding daarentegen overlappen de valentie- en geleidingsband elkaar (zie fig. 12*a*) of is er bij de stoechiometrische samenstelling al een gedeeltelijk gevulde band, zodat $\Delta E_g = 0$. In dit geval behoeft voor het onderbrengen van een extra elektron niet eerst de energie ΔE_g, of $\Delta E_g - E_d$, opgebracht te worden en is $E(e)$ klein. De existentiegebieden kunnen dan breed zijn, mede omdat bij toevoegen van grote hoeveelheden *A het energieniveau slechts langzaam zal stijgen door de grote toestandsdichtheid bij het Fermi-niveau.

In dit kader past het markante verschil tussen verbindingen als GaSb en MnSb. De chalkogeniden (verbindingen van S, Se, Te) van de elementen van de tweede groep van het periodiek systeem en de pnictiden (verbindingen van P, As, Sb, Bi) van de elementen van de derde groep zijn halfgeleiders en hebben smalle

Dr. W. Albers, medewerker van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven; prof. dr. C. Haas, destijds medewerker van hetzelfde laboratorium, thans hoogleraar in de Anorganische Chemie aan de Rijksuniversiteit te Groningen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

existentiegebieden (type fig. 12*b*). De overeenkomstige chalkogeniden en pnictiden van de overgangsmetalen echter vertonen metallische geleiding en hebben brede existentiegebieden. Dit verschil in breedten komt duidelijk tot uiting in *fig. 13*, waar de chemische spectra, d.z. doorsneden door het *T*-*x*-fazediagram bij een constante T ($\approx$ 500 °C), van deze systemen zijn weergegeven. In overgangsmetaalverbindingen zijn twee typen elektronentoestanden van belang. Enerzijds vormen de

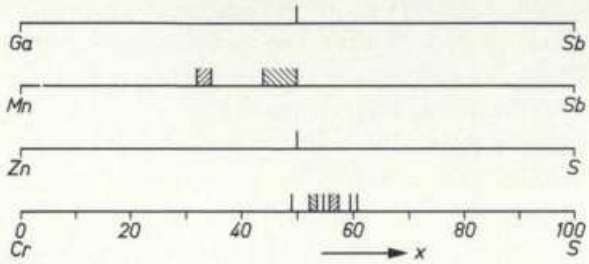

Fig. 13. De zg. chemische spectra, d.z. doorsneden door het *T*-*x*-diagram bij een constante temperatuur ($\approx$ 500 °C), van de systemen Ga-Sb, Mn-Sb, Zn-S en Cr-S. De samenstellingsparameter x is uitgedrukt in at.% S of Sb. We zien bij de Mn-verbindingen van Sb bredere existentiegebieden dan bij de Ga-verbinding. Evenzo bij de Cr-verbindingen van S, vergeleken met die van Zn.

s- resp. p-elektronen brede banden, anderzijds vormen de binnenbanen (b.v. de 3d-banen van de 3d-overgangsmetalen) gelokaliseerde niveaus of zeer smalle banden (overlapping klein), waaronder ook lege, doordat de binnenschil van het overgangsmetaal slechts gedeeltelijk gevuld is. Van de acht mogelijke grondtypen[8] is er één weergegeven in fig. 12*c*, waar de brede valentieband doorsneden wordt door de laagstliggende, oorspronkelijk ongevulde, zeer smalle band (ΔE_c b.v. in de orde van 0,1 eV), zodat nu beide banden slechts gedeeltelijk gevuld zijn. In dit geval is $\Delta E_g = 0$ en ΔE_c zeer klein, zodat brede existentiegebieden mogelijk zijn.

Smalle existentiegebieden

Op basis van hetgeen in deel II behandeld is, kunnen smalle existentiegebieden berekend worden. Dit zal in het kort besproken worden met de halfgeleider CdTe als voorbeeld. Onder existentiegebied (projectie) wordt verstaan het concentratiegebied dat omsloten wordt door de projectie op het *T*-*x*-vlak van de lijn in het ruimtelijke binaire *P*-*T*-*x*-fazediagram die in de driefazenevenwichten de samenstellingen van de coëxisterende vaste verbinding weergeeft (zie fig. 19)[9]. Het existentiegebied van CdTe kan berekend worden als de evenwichtsconstanten en de coëxisterende partiële dampspanning $P(\mathrm{Cd})^b$ van Cd (of die van Te) langs de gehele grens (vandaar de index b, van „boundary") van het existentiegebied bekend zijn[10].

Op grond van experimentele gegevens kan men zich een idee vormen over de wijzen waarop opgelost Cd en Te in CdTe worden ingebouwd (*fig. 14*). CdTe(Cd) blijkt een halfgeleider van het *N*-type te zijn en CdTe(Te) van het *P*-type. Zelfdiffusiemetingen met radioactief cadmium in proefstukjes CdTe met verschillende afwijkingen van de stoechiometrische samenstelling geven een aanwijzing dat de wanorde van het Frenkeltype is. Bij hoge drukken $P(\mathrm{Cd})$ blijkt de elektronenconcentratie evenredig te zijn met $P(\mathrm{Cd})^{1/2}$. Bij hoge $P(\mathrm{Cd})$ zullen dus Cd_i^+ en e domineren en bij lage

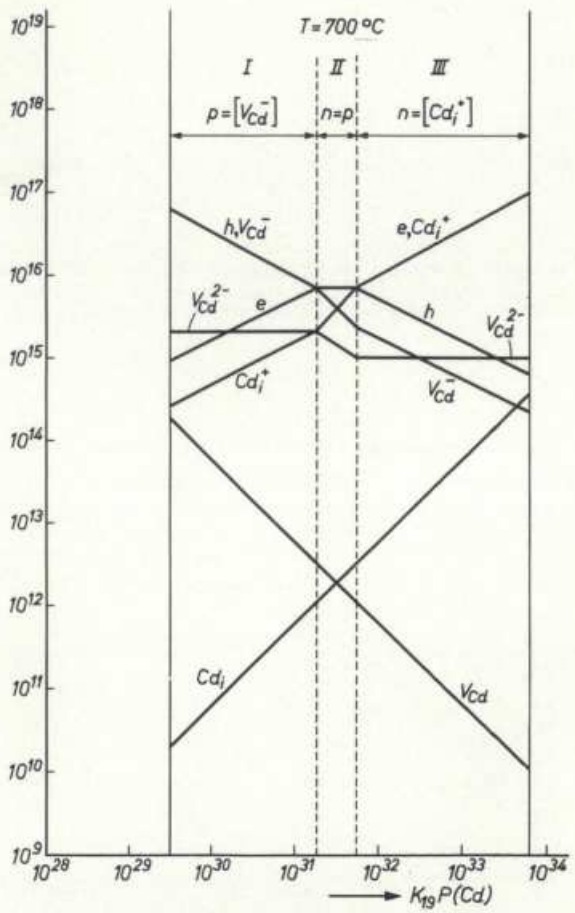

Fig. 14. Concentraties van elektronen, gaten en eigen puntfouten in CdTe als functie van $P(\mathrm{Cd})$ bij 700 °C. De verticale getrokken lijnen geven de grenzen van het existentiegebied aan. (Deze zelfde figuur komt als fig. 11 in deel II voor.)

[*] De delen I en II van dit artikel (I. Existentiegebied; II. Puntfouten en de beheersing van hun concentraties) zijn verschenen in Philips techn. T. **30**, 83-90 en 102-107, 1969 (nos. 3 en 4).

[8] W. Albers en C. Haas, Physics Letters **8**, 300, 1964.

[9] Fig. 16 geeft een existentiegebied (projectie) weer. Dit dient onderscheiden te worden van het existentiegebied (doorsnede) dat is weergegeven in fig. 7 uit deel I en dat een doorsnede bij constante totale druk door de ruimtelijke *P*-*T*-*x*-figuur representeert.

[10] In deel II zijn in tabel II voor de coëxisterende partiële dampspanning van B_2 (= O_2, S_2 en Te_2) twee symbolen gebruikt, $P(B_2)^{AB(A)}$ en $P(B_2)^{AB(B)}$, maar omdat bij het beschouwen van de gehele grens van het existentiegebied de AB(A)-grens en de AB(B)-grens soepel in elkaar overgaan, wordt nu voor Te_2 één symbool $P(Te_2)^b$ gebruikt, evenals één symbool $P(\mathrm{Cd})^b$ voor Cd.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

P(Cd): V_{Cd}^{-} en h. Andere eigen puntfouten blijken te zijn effectief neutraal Cd_i en V_{Cd} en de effectief dubbelgeladen cadmiumvacature V_{Cd}^{2-}. De relevante serie evenwichtsbetrekkingen is:

$$\left.\begin{aligned} P(\mathrm{Cd})P(\mathrm{Te_2})^{1/2} &= K(\mathrm{CdTe}) \\ np &= K_1 \\ [\mathrm{Cd_i^+}]n &= K_{19}P(\mathrm{Cd}) \\ \frac{[\mathrm{Cd_i^+}]n}{[\mathrm{Cd_i}]} &= K_{20} \\ \frac{[V_{Cd}^{-}]p}{[V_{Cd}]} &= K_{21} \\ [\mathrm{Cd_i^+}]\,[V_{Cd}^{-}] &= K_{22} \\ \frac{[V_{Cd}^{2-}]p}{[V_{Cd}^{-}]} &= K_{23} \end{aligned}\right\}, \quad \ldots \quad (70)$$

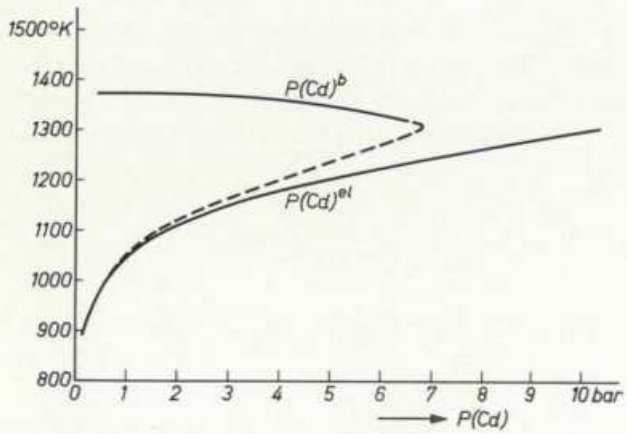

Fig. 15. De partiële cadmiumdampdruk $P(\mathrm{Cd})^b$ voor met Cd verzadigd CdTe en $P(\mathrm{Cd})^{el}$, de verzadigingsdampdruk van elementair cadmium, als functie van de temperatuur (naar Lorenz [111]). Het onderbroken deel van de curve $P(\mathrm{Cd})^b$ is geëxtrapoleerd.

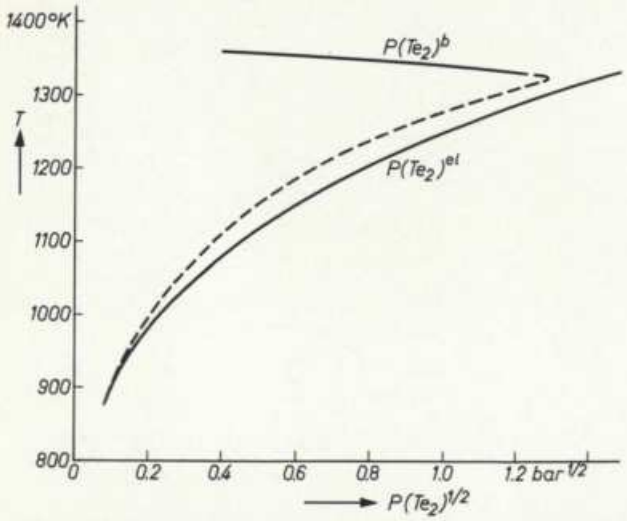

Fig. 16. De partiële telluurdampdruk $P(\mathrm{Te_2})^b$ voor met Te verzadigd CdTe en $P(\mathrm{Te_2})^{el}$, de verzadigingsdampdruk van elementair telluur, als functie van de temperatuur (naar Lorenz [111]).

terwijl de elektroneutraliteitsvoorwaarde voor de vaste faze luidt:

$$[V_{Cd}^{-}] + 2[V_{Cd}^{2-}] + n = [\mathrm{Cd_i^+}] + p.$$

Dit zijn acht vergelijkingen waarin voorkomen $P(\mathrm{Cd})$-$P(\mathrm{Te_2})$, de concentraties van vijf atomaire eigen puntfouten en die van gaten en elektronen. De concentratie, van de puntdefecten aan de grens van het existentieges bied als functie van de temperatuur, en derhalve het gehele existentiegebied van CdTe kunnen dus berekend worden indien $P(\mathrm{Cd})$, of $P(\mathrm{Te_2})$, en alle evenwichtsconstanten K als functie van de temperatuur bekend zijn. *Fig. 15* en *16* geven $P(\mathrm{Cd})^b$ en $P(\mathrm{Te_2})^b$ als functie van T, experimenteel bepaald [111]. De evenwichtsconstante K(CdTe) kan berekend worden uit $RT \ln K(\mathrm{CdTe}) = -\Delta G^0(T)$, waarin $\Delta G^0(T)$ de vrije enthalpie van de vorming bij T is volgens de reactie $\mathrm{Cd(gas)} + \frac{1}{2}\,\mathrm{Te_2(gas)} \rightleftarrows \mathrm{CdTe(kristal)}$. Uit bekende thermodynamische gegevens vindt men:

$$\log K(\mathrm{CdTe}) = 10{,}66 - 15440/T. \quad . \quad (71)$$

Met verg. (71) en de gegevens uit figuren 15 en 16 is nu in principe $P(\mathrm{Cd})^b$ langs de gehele grens van het existentiegebied bekend (zie *fig. 17*). $P(\mathrm{Cd})^b$ gaat naar nul voor $T = 0$ °K en vertoont knikken bij 594 °K en 723 °K, waar eerste-orde-fazeovergangen van vloeistof naar vast plaatsvinden, nl. eutectica in het faze-

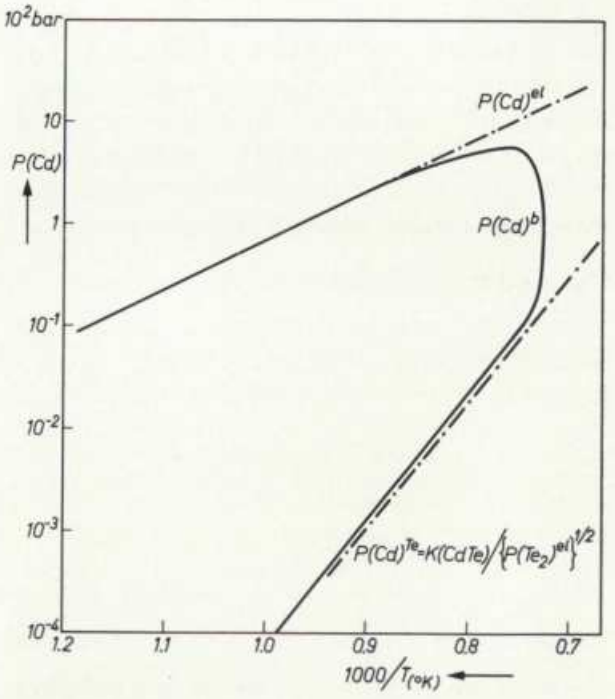

Fig. 17. De partiële cadmiumdampdruk $P(\mathrm{Cd})^b$ als functie van T voor CdTe, bij hoge temperatuur. De streep-puntlijnen zijn de verzadigingsdampdrukken van elementair cadmium en van elementair telluur; de laatste is met behulp van de in de figuur aangegeven formule omgerekend in cadmiumdampdruk.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

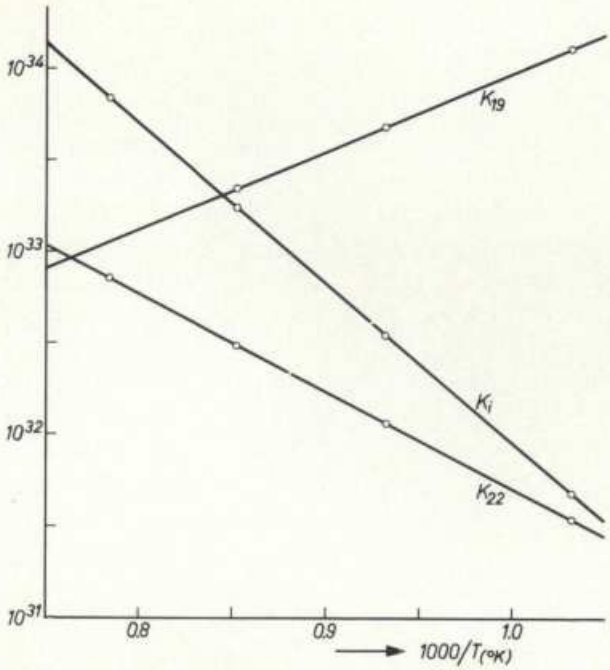

Fig. 18. Een aantal evenwichtsconstanten als functie van de temperatuur.

diagram van het systeem Cd-Te. De evenwichtsconstante K_i als functie van T (zie *fig. 18*) is berekend uit $K_i = N_c N_v \exp(-\Delta E_g/kT)$, waarin ΔE_g, de verboden energiezone voor CdTe, bepaald is uit optische metingen (1,5 eV bij 300 °K). N_c en N_v kunnen berekend worden uit verg. (52) en (53) (uit II) als m^*(e) en m^*(h) bekend zijn. Deze zijn bepaald uit metingen van de thermokracht en het Hall-effect en zijn resp. 0,14 m en 0,35 m. K_{20}, K_{21} en K_{23} als functie van T zijn bekend uit de desbetreffende ionisatie-energieën, welke bepaald werden uit de temperatuurafhankelijkheid van het Hall-effect. Zo is $K_{20} = 2\,N_c \exp(-0{,}02\ eV/kT)$, waarin de factor 2 verschijnt omdat in de puntfout Cd_i^+ in de grondtoestand twee oriëntaties van de spin van het elektron mogelijk zijn, terwijl in de effectief neutrale puntfout Cd_i maar één configuratie mogelijk is voor de twee aanwezige elektronen. $K_{19} = K_{19}^0 \exp(-\Delta H/RT)$ wordt als volgt berekend. Voor hoge drukken van P(Cd) geldt de gereduceerde elektroneutraliteitsbetrekking $[Cd_i^+] = n$ (zie rechterzijde van fig. 14). Dit gesubstitueerd in verg. (70) geeft $K_{19} = n^2/P(Cd)$. Door nu de elektronenconcentratie (b.v. verkregen uit metingen van het Hall-effect) te bepalen bij twee verschillende temperaturen bij hoge, bekende cadmiumdruk, verkrijgt men K_{19}^0 en de bijbehorende ΔH, en dus K_{19} als functie van T. In principe kan op dezelfde wijze $K_{24}(T)$ uit de relatie $[V_{Cd}^-]p = K_{24}P(Te_2)^{1/2}$ bepaald worden, met behulp waarvan dan $K_{22} = \{K_{24}K_{19}K(CdTe)\}/K_i$ bekend is.

Met deze gegevens zijn de isothermen (concentratie versus partiële druk) in fig. 14 getekend en is *fig. 19* tot stand gekomen, die het middelste gedeelte van het T-x-fazediagram (projectie) van het systeem Cd-Te weergeeft, waarbij de gaslijn is weggelaten. Fig. 19 toont het gehele existentiegebied van CdTe tussen 0 °K en T_m (het smeltpunt-maximum) met op de horizontale as op de gebruikelijke manier de concentratie van Te in at.%. Exact stoechiometrisch CdTe begint te smelten bij een temperatuur die 30 °K lager

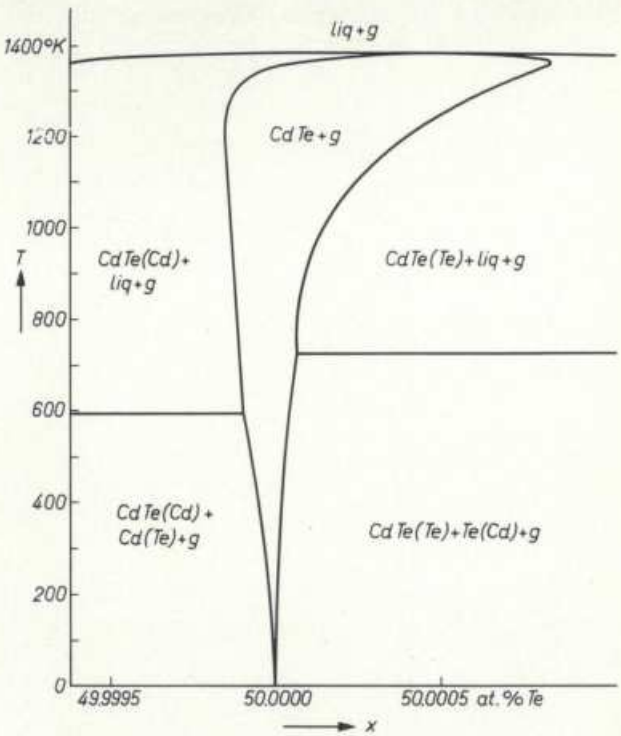

Fig. 19. Het existentiegebied (projectie) van CdTe.

ligt dan T_m. Boven 1000 °K ligt het existentiegebied uitgesproken aan de Te-kant, beneden 1000 °K aan de Cd-kant. Het smeltpunt-maximum ligt aan de Te-kant met een overschot $\delta Te \approx 2 \times 10^{17}$ Te-atomen per cm^3; dat wil zeggen een afwijking van de stoechiometrische samenstelling in de orde van 10^{-3} at.%. Deze samenstelling ligt ongeveer halverwege de extreme grenswaarden van het existentiegebied, zijnde 49,99985 at.% Te bij 1170 °K en 50,00085 at.% Te bij 1350 °K.

Fig. 20 toont het, op soortgelijke wijze bepaalde existentiegebied van de halfgeleider SnS [12], als voorbeeld van een verbinding waarbij voor $T > 0$ °K het existentiegebied geheel buiten de stoechiometrische samenstelling ligt.

Er moet de nadruk op gelegd worden dat de existentiegebieden weergegeven in fig. 19 en 20 gebaseerd zijn

[11] M. R. Lorenz, J. Phys. Chem. Solids **23**, 939, 1962.
[12] H. Rau, J. Phys. Chem. Solids **27**, 761, 1966.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

op modellen die aangeven welke soorten eigen puntfouten in het kristal aanwezig zijn. Hoewel de tot nu toe bekende experimentele gegevens consistent zijn met deze modellen, is het niet zonder meer uitgesloten dat nog andere soorten eigen puntfouten aanwezig zijn. Bij voorbeeld: associaten van neutrale cadmiumvacatures die in evenwicht zijn met de effectief geladen cadmiumvacatures V_{Cd}^{-} en V_{Cd}^{2-}, gaten en elektronen. De neutrale dubbelvacature $(V_{Cd})_2$ zou b.v. gestabiliseerd kunnen worden door covalente binding tussen twee naburige telluuratomen (algemene notatie van

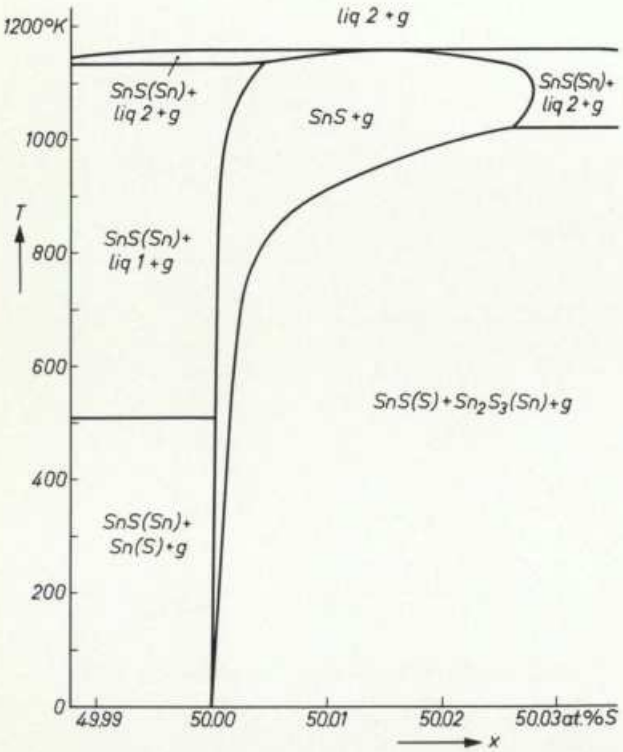

Fig. 20. Het existentiegebied (projectie) van SnS (naar Rau [12]).

deze eigen puntfout: *Te_2, zie II), overeenkomstig het feit dat telluurdamp naast Te-atomen ook Te_2-moleculen bevat. Dit is schematisch weergegeven in *fig. 21*. Ook zouden meervoudige associaten $(V_{Cd})_n$ kunnen voorkomen. In dat geval zal de vorm en de plaats van het existentiegebied anders zijn dan boven is afgeleid. Zijn echter alle typen eigen puntfouten en de corresponderende evenwichtsconstanten bekend, dan is het existentiegebied nauwkeurig te bepalen, mits het smal is.

Brede existentiegebieden

Voor het bepalen van brede existentiegebieden is de bovenbesproken methode niet geschikt, omdat verg. (31)-(33), (48), (49) enz. (in II) voor grote concentraties niet gelden. Wel echter blijft ook hier de analyse van de

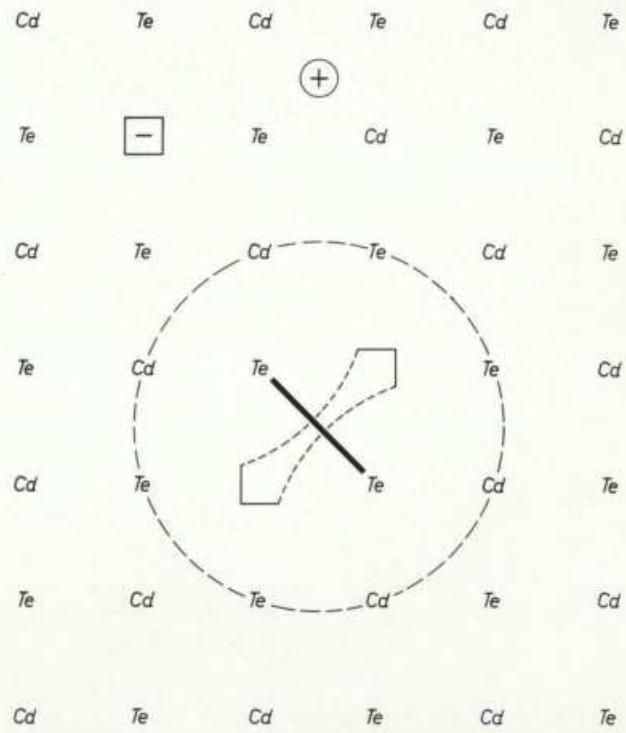

Fig. 21. Schematische voorstelling van een hypotetisch CdTe-kristal met atomaire wanorde. ⊕ is een vrij gat, ⊟ is een gelokaliseerde, effectief negatief geladen cadmiumvacature V_{Cd}^{-}, en de omcirkelde eigen puntfout is een effectief neutrale cadmium-dubbelvacature $(V_{Cd})_2$. De schuine dikke streep symboliseert de covalente binding tussen de twee naburige telluuratomen.

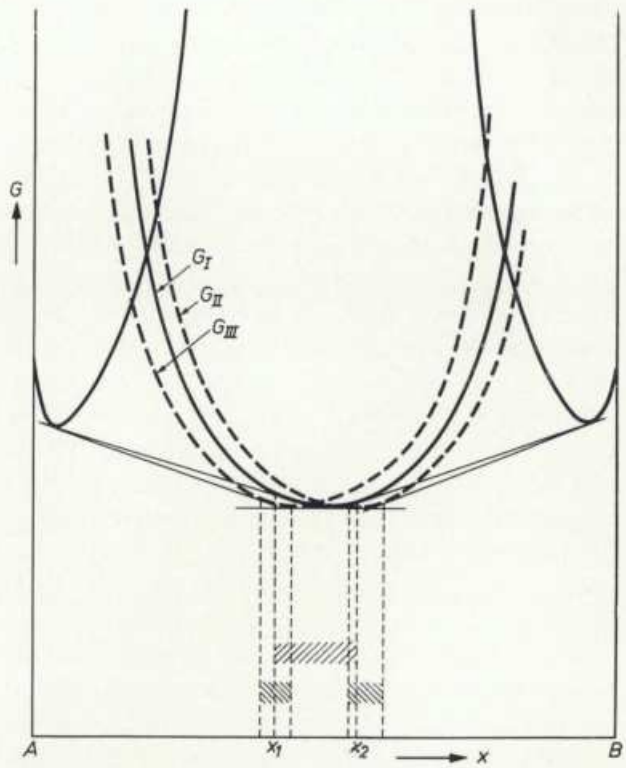

Fig. 22. Ter verklaring van het uiteenvallen van een breed existentiegebied in verschillende existentiegebieden door wisselwerking van eigen puntfouten. G_I beantwoordt aan de ongeordende structuur, G_{II} en G_{III} aan verschillende typen ordening van de puntfouten.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

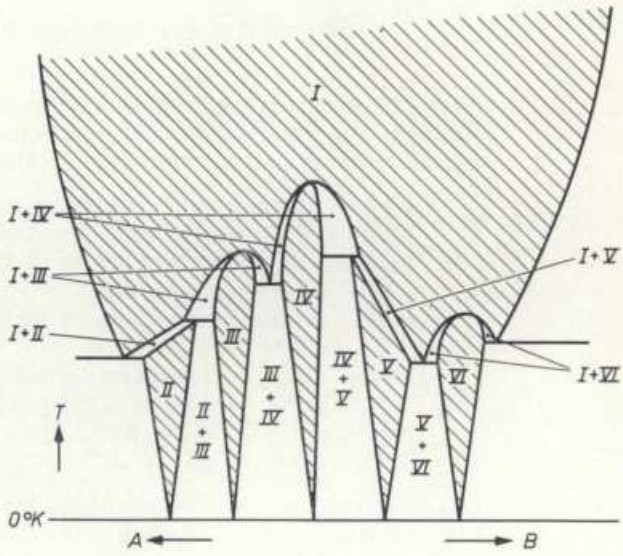

Fig. 23. Gedeeltelijk T-x-diagram dat het uiteenvallen toont van een breed existentiegebied in verschillende smallere existentiegebieden, zoals zich dat bij lage temperatuur kan voordoen.

coëxisterende gasfaze van belang, omdat evenwichtsverbanden als verg. (60) en (61) (in II) onverkort geldig blijven.

Voor verbindingen met brede existentiegebieden kunnen chemische analyse, metaalmicroscopisch onderzoek en het bepalen van de roosterparameters en de dichtheid als functie van de samenstelling en de temperatuur informatie geven over de breedte van het existentiegebied en over het type van de dominante eigen puntfouten.

We willen dit artikel besluiten met enkele opmerkingen over het uiteenvallen van een breed existentiegebied in een aantal smallere, dat bij lage temperaturen kan optreden. Wanneer AB veel opgeloste eigen atomen bevat, treden merkbare onderlinge wisselwerkingen op, die, bij bepaalde concentraties (b.v. bij x_1 en x_2, zie *fig. 22*), kunnen leiden tot bepaalde typen ordening (*II* en *III*) van de puntfouten. Het ontstaan van zulke superstructuren gaat gepaard met een verlaging van de vrije enthalpie ΔG_{super}, hetgeen tot gevolg heeft dat beneden een bepaalde temperatuur $T_0 = \Delta G_{\text{super}}/k$ het homogene gebied AB met regelloos verdeelde opgeloste eigenatomen (*I* in fig. 22) uiteen kan vallen in een aantal existentiegebieden. Dit leidt tot uiervormige T-x-diagrammen, waarvan er een schematisch is weergegeven in *fig. 23*. Dit gebeurt o.a. in het Cr-S-systeem (zie fig. 13), waar tussen de samenstellingen CrS en Cr_2S_3 zulk een serie stabiele fazen is aan te wijzen [13].

[13] F. Jellinek, Acta cryst. **10**, 620, 1957.

Samenvatting. In dit derde en laatste deel van het artikel over stoechiometrie wordt de bepaling van existentiegebieden behandeld. Ter inleiding wordt verklaard waarom halfgeleiders en isolatoren veelal smalle, metallische verbindingen brede existentiegebieden hebben. Vervolgens wordt een berekening gegeven van het — uiterst smalle — existentiegebied van de halfgeleider CdTe. Tot slot van het artikel wordt in het kort het verschijnsel behandeld dat een breed existentiegebied in een aantal smallere existentiegebieden uiteenvalt, hetgeen zich bij lage temperatuur kan voordoen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Recente wetenschappelijke publikaties

Deze publikaties zijn afkomstig van medewerkers van laboratoria en fabrieken, behorende tot of samenwerkende met ondernemingen van het Philipsconcern, in het bijzonder van medewerkers van de navolgende research-laboratoria:

Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven	*E*
Mullard Research Laboratories, Redhill (Surrey), Engeland	*M*
Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquée, Limeil-Brévannes (Val-de-Marne), Frankrijk	*L*
Philips Zentrallaboratorium GmbH, Laboratorium Aken, Weisshausstrasse, 51 Aachen, Duitsland	*A*
Philips Zentrallaboratorium GmbH, Laboratorium Hamburg, Vogt-Kölln-Strasse 30, 2 Hamburg-Stellingen, Duitsland	*H*
MBLE Laboratoire de Recherches, 2 avenue Van Becelaere, Brussel 17 (Boitsfort), België.	*B*

Van de meeste dezer publikaties zullen binnenkort overdrukken beschikbaar zijn. Men kan deze aanvragen bij het betrokken laboratorium (zie de codeletter) of bij de Administratie van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.

Ph. van Bastelaer: The design of band-pass filters with piezoelectric resonators.
Rev. HF **7**, 193-206, 1968 (No. 7). *B*

K. H. J. Buschow & W. A. J. J. Velge (Philips Philite and Metalware Manufacturing Division, Eindhoven): Permanent magnetic materials of rare earth cobalt compounds.
Z. angew. Physik **26**, 157-160, 1969 (No. 2). *E*

H. J. van Daal & K. H. J. Buschow: Influence of *s-f* exchange interaction on electrical conduction in rare-earth dialuminides.
Solid State Comm. **7**, 217-221, 1969 (No. 1). *E*

F. Desvignes & J. Ohnet: Caractérisation et mesure des propriétés des capteurs de rayonnement.
Techniques Philips 1968, No. 6, 2-19. *L*

G. Diemer & J. H. Emck (Technical University, Eindhoven): The education of physicists for work in industry; Int. Seminar, Eindhoven 1968.
Proceedings 55 pp., Source Book of papers and statements 266 pp.; publ. Centrex, Eindhoven. *E*

F. C. Eversteyn & H. L. Peek: Preparation and stability of enhancement *n*-channel MOS transistors with high electron mobility.
Philips Res. Repts. **24**, 15-33, 1969 (No. 1). *E*

H. C. de Graaff: Approximate calculations on the spreading resistance in multi-emitter structures.
Philips Res. Repts. **24**, 34-52, 1969 (No. 1). *E*

H. C. de Graaff: Two new methods for determining the collector series resistance in bipolar transistors with lightly doped collectors.
Philips Res. Repts. **24**, 70-81, 1969 (No. 1). *E*

G. H. Jonker: Semiconducting properties of lanthanum-cobalt oxide.
Philips Res. Repts. **24**, 1-14, 1969 (No. 1). *E*

J. A. Pals & H. C. de Graaff: On the behaviour of the base-collector junction of a transistor at high collector current densities.
Philips Res. Repts. **24**, 53-69, 1969 (No. 1). *E*

R. F. Pearson, A. D. Annis & P. Kompfner: Photomagnetic anneal properties of silicon-doped yttrium iron garnet.
Phys. Rev. Letters **21**, 1805-1807, 1968 (No. 27). *M*

A. Rabenau, H. Rau & G. Rosenstein: Darstellung und Eigenschaften von $AuTe_2J$.
Angew. Chemie **81**, 148, 1969 (No. 4). *A*

P. Schagen: Fortschritte auf dem Gebiet der Bildwandler und Bildverstärker.
Umschau in Wiss. u. Technik **69**, 85, 1969 (No. 3). *M*

B. Schneider: Interaction between spin waves and electrons in a hybrid structure of YIG and InSb.
Appl. Phys. Letters **13**, 405-407, 1968 (No. 12). *H*

L. A. Æ. Sluyterman & M. J. M. de Graaf: The activity of papain in the crystalline state.
Biochim. biophys. Acta **171**, 277-287, 1969 (No. 2). *E*

J. Tillack & Renate Kaiser: Wolfram(IV)-oxidbromid, $WOBr_2$.
Angew. Chemie **81**, 149-150, 1969 (No. 4). *A*

Q. H. F. Vrehen, A. Broese van Groenou & J. G. M. de Lau: Relaxation of ferromagnetic precession by excitation of spin-waves in a polycrystalline ferrite.
Solid State Comm. **7**, 117-121, 1969 (No. 1). *E*

F. W. Willmott: An informal symposium of the Gas Chromatography Discussion Group.
J. Gas Chromatogr. **6**, 569-571, 1968 (No. 12). *M*

Jaargang 30, 1969, no. 5 blz. 121-152 Verschenen 8 september 1969

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!